

Titre: Effet de l'encombrement visuel de l'écran primaire de vol sur la
Title: performance du pilote, la charge de travail et le parcours visuel

Auteur: Philippe Doyon-Poulin
Author:

Date: 2014

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Doyon-Poulin, P. (2014). Effet de l'encombrement visuel de l'écran primaire de vol
sur la performance du pilote, la charge de travail et le parcours visuel [Ph.D.
Citation: thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/1533/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1533/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Jean-Marc Robert
Advisors:

Programme: Génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

EFFET DE L'ENCOMBREMENT VISUEL DE L'ÉCRAN PRIMAIRE DE VOL
SUR LA PERFORMANCE DU PILOTE, LA CHARGE DE TRAVAIL ET LE
PARCOURS VISUEL

PHILIPPE DOYON-POULIN

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR

(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

EFFET DE L'ENCOMBREMENT VISUEL DE L'ÉCRAN PRIMAIRE DE VOL SUR LA
PERFORMANCE DU PILOTE, LA CHARGE DE TRAVAIL ET LE PARCOURS VISUEL

présentée par : DOYON-POULIN Philippe

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae doctor

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph. D., président

M. ROBERT Jean-Marc, Doct., membre et directeur de recherche

M. DESMARAIS Michel, Ph. D., membre

M. BOY Guy André, Ph. D., membre

DÉDICACE

À mes parents

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier ceux et celles qui m'ont permis de réaliser cette thèse de doctorat. En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Jean-Marc Robert, sans qui ce travail n'aurait pas existé. Il a été pour moi une figure de mentor, un professeur passionné et un chercheur rigoureux qui a su me transmettre son feu sacré pour la recherche.

Je voudrais aussi remercier Mme Sophie Duchesne et M. Benoit Ouellette, spécialistes des facteurs humains chez Bombardier Aéronautique. Grâce à leur aide, j'ai bénéficié d'une bourse au sein de l'équipe des facteurs humains de Bombardier Aéronautique où j'ai œuvré à leurs côtés durant plus de quatre années. J'y ai appris plusieurs aspects de l'ergonomie et de la conception de poste de pilotage, tout en bénéficiant de leurs précieux conseils pour la réalisation de l'étude en simulateur de vol.

J'en profite également pour remercier tous les pilotes qui ont participé à l'étude en simulateur de vol pour leur temps et leurs commentaires pertinents sur les affichages testés.

Je remercie aussi mes proches amis de Polytechnique avec qui j'ai fait mes classes en ergonomie et qui m'ont aidé à plus d'un titre : M. Aurélien Blond, M. Alexandre Galliez, M. Grégory Petit, M. Jocelyn Richard et M. Étienne Viale.

Merci à ma famille pour m'avoir épaulé tout au long de ma vie et encouragé à compléter des études supérieures; je n'y serais pas parvenu sans votre aide.

Finalement, merci à ma conjointe Kenza El Khazraji pour avoir été là dans les moments de joie comme de tristesse. Nous nous sommes rencontrés étudiants; nous pouvons maintenant entamer notre vie adulte.

RÉSUMÉ

Le poste de pilotage d'un avion de ligne du XXI^e siècle ne ressemble pas à celui que les frères Wright ont occupé lors de leur premier vol. En effet, la croissance accélérée de l'aviation civile a entraîné une augmentation et une complexification des instruments de vol du poste de pilotage afin de compléter le vol en toute sécurité et dans les temps prévus. Or, présenter au pilote une abondance d'information visuelle par l'entremise d'instruments de vol visuellement encombrés risque de diminuer sa performance de vol.

La thématique de l'encombrement visuel des écrans a reçu un intérêt croissant de la communauté aéronautique qui cherche à connaître les effets de la densité et de la surcharge d'information sur le travail des pilotes. La réglementation aérienne demande de minimiser l'encombrement visuel des écrans du poste de pilotage. Les études précédentes sur le sujet ont trouvé un effet mixte de l'encombrement visuel de l'écran primaire de vol sur la performance technique de vol des pilotes. D'autres recherches s'avéraient donc nécessaire pour mieux comprendre ce phénomène.

Dans cette thèse, nous avons réalisé une étude expérimentale dans un simulateur de vol afin d'étudier les effets de l'encombrement visuel de l'écran primaire de vol sur la performance du pilote, sa charge mentale de travail et son parcours visuel. Tout d'abord, nous avons identifié une lacune dans les définitions existantes de l'encombrement visuel d'un affichage et nous avons proposé une nouvelle définition pertinente pour le milieu aéronautique qui tient compte du contexte d'utilisation de l'affichage. Ensuite, nous avons montré que les études précédentes sur l'effet de l'encombrement visuel de l'écran primaire de vol sur la performance des pilotes ont mal isolé la variable d'encombrement visuel en manipulant celle-ci en même temps que la fonction de guidage de l'appareil. L'utilisation d'une fonction de guidage différente entre les affichages peut avoir masquée l'effet de l'encombrement visuel sur la performance du pilote. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé trois exigences que tous les affichages à l'étude doivent satisfaire afin d'assurer que seule la variable d'encombrement visuelle est manipulée durant l'étude en laissant intouchées les autres variables.

Ensuite, nous avons conçu trois écrans primaires de vol ayant un niveau d'encombrement visuel différent (faible, modéré, élevé) mais la même fonction de guidage, en respectant les exigences mentionnées ci-dessus. Douze pilotes, comptant chacun en moyenne plus de 4000 heures de vol, ont complété une approche aux instruments dans un simulateur de vol en utilisant chacun des

écrans pour un total de neuf répétitions. Les principaux résultats montrent que les pilotes ont rapporté un niveau de charge mentale de travail inférieure et ont obtenu une meilleure précision latérale durant l'approche en utilisant l'écran ayant un niveau modéré d'encombrement visuel comparativement aux écrans ayant un niveau faible et un niveau élevé d'encombrement visuel. Les pilotes ont aussi jugé que l'écran modérément encombré a été le plus utile pour la tâche de vol comparativement aux deux autres écrans. Les résultats d'oculométrie montrent que l'efficacité du parcours visuel du pilote a diminué pour l'écran ayant un encombrement élevé comparativement aux écrans ayant un encombrement faible et un encombrement modéré.

Globalement, ces nouveaux résultats expérimentaux révèlent la pertinence d'optimiser l'encombrement visuel des affichages de vol, car il affecte la performance objective et subjective de pilotes expérimentés dans la tâche de vol. La thèse se conclut avec des recommandations pratiques visant à permettre aux concepteurs d'optimiser l'encombrement visuel des écrans dans les interfaces humain-machine.

ABSTRACT

Flight deck of 21st century commercial aircrafts does not look like the one the Wright brothers used for their first flight. The rapid growth of civilian aviation resulted in an increase in the number of flight deck instruments and of their complexity, in order to complete a safe and on-time flight. However, presenting an abundance of visual information using visually cluttered flight instruments might reduce the pilot's flight performance.

Visual clutter has received an increased interest by the aerospace community to understand the effects of visual density and information overload on pilots' performance. Aerospace regulations demand to minimize visual clutter of flight deck displays. Past studies found a mixed effect of visual clutter of the primary flight display on pilots' technical flight performance. More research is needed to better understand this subject.

In this thesis, we did an experimental study in a flight simulator to test the effects of visual clutter of the primary flight display on the pilot's technical flight performance, mental workload and gaze pattern. First, we identified a gap in existing definitions of visual clutter and we proposed a new definition relevant to the aerospace community that takes into account the context of use of the display. Then, we showed that past research on the effects of visual clutter of the primary flight display on pilots' performance did not manipulate the variable of visual clutter in a similar manner. Past research changed visual clutter at the same time than the flight guidance function. Using a different flight guidance function between displays might have masked the effect of visual clutter on pilots' performance. To solve this issue, we proposed three requirements that all tested displays must satisfy to assure that only the variable of visual clutter is changed during study while leaving other variables unaffected.

Then, we designed three primary flight displays with a different visual clutter level (low, medium, high) but with the same flight guidance function, by respecting the previous requirements. Twelve pilots, with a mean experience of over 4000 total flight hours, completed an instrument landing in a flight simulator using all three displays for a total of nine repetitions. Our results showed that pilots reported lower workload level and had better lateral precision during the approach using the medium-clutter display compared to the low- and high-clutter displays. Also, pilots reported that the medium-clutter display was the most useful for the flight

task compared to the two other displays. Eye tracker results showed that pilots' gaze pattern was less efficient for the high-clutter display compared to the low- and medium-clutter displays.

Overall, these new experimental results emphasize the importance of optimizing visual clutter of flight displays as it affects both objective and subjective performance of experienced pilots in their flying task. This thesis ends with practical recommendations to help designers optimize visual clutter of displays used for man-machine interface.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES FIGURES	xviii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET GLOSSAIRE	xxii
LISTE DES ANNEXES	xxv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 BESOINS DU MILIEU DE PRATIQUE, PRINCIPAUX INSTRUMENTS DE VOL ET RÉGLEMENTATION AÉRIENNE	5
1.1 Besoins du milieu de pratique	5
1.2 Affichage des instruments de vol	6
1.2.1 Les instruments de base: le <i>Basic-T</i>	7
1.2.2 Affichage primaire de vol	10
1.2.3 Fonctions de guidage de vol.....	11
1.2.4 Synthèse	16
1.3 Organismes réglementaires	17
1.3.1 Écran primaire de vol	17
1.3.2 Exigences relatives à l'encombrement visuel	18
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'ENCOMBREMENT VISUEL DES ÉCRANS	22

2.1	Revue des définitions de l'encombrement visuel.....	22
2.1.1	Nombre d'éléments	23
2.1.2	Interférence avec la vue extérieure.....	24
2.1.3	Définition opérationnelle.....	25
2.1.4	Information inappropriée.....	26
2.1.5	Pertinence au domaine de l'aviation	27
2.1.6	Dépendance au contexte.....	28
2.1.7	Synthèse	30
2.2	Contributeurs à l'encombrement.....	31
2.2.1	Densité visuelle	32
2.2.2	Densité d'information	39
2.2.3	Organisation d'une interface	41
2.2.4	Autres considérations	43
2.3	Revue des métriques de mesure de l'encombrement d'un affichage	44
2.3.1	Algorithme d'analyse d'image	50
2.3.2	Questionnaire	51
2.3.3	Oculométrie.....	52
2.3.4	Synthèse	53
2.4	Effets de l'encombrement sur la performance	53
2.4.1	Prospection visuelle.....	54
2.4.2	Conduite de l'avion	59
2.4.3	Nouvelles exigences pour la manipulation de l'encombrement.....	67
2.5	Synthèse	70
CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES.....		71

3.1	Problématique.....	71
3.2	Objectifs	71
3.3	Choix stratégique.....	72
3.4	Hypothèses	73
CHAPITRE 4 CONCEPTION DES AFFICHAGES		75
4.1	Exigences d'information et d'organisation des affichages	75
4.2	Grille de manipulation de l'encombrement visuel	77
4.3	Revue des affichages existants et inspiration	79
4.4	Présentation des affichages	82
4.5	Analyse des affichages	86
4.5.1	Métrie d'encombrement global	86
4.5.2	Carte d'encombrement	87
4.6	Synthèse	90
CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE		92
5.1	Participants	92
5.2	Appareil et instrumentation	93
5.2.1	Simulateur de vol	93
5.2.2	Questionnaires	96
5.2.3	Oculomètre	99
5.3	Tâche et scénario de vol	100
5.4	Procédure.....	103
5.5	Variables indépendantes.....	104
5.5.1	Niveau d'encombrement visuel du PFD	104
5.5.2	Étape de vol.....	105

5.6	Variables dépendantes et traitement des données	105
5.6.1	Évaluation de l'encombrement visuel	106
5.6.2	Charge mentale de travail.....	106
5.6.3	Qualités visuelles.....	106
5.6.4	Performance technique de vol	106
5.6.5	Parcours visuel	108
5.7	Analyse des résultats	109
5.7.1	Plan expérimental.....	110
5.8	Approbation du comité éthique de la recherche avec des sujets humains	111
CHAPITRE 6	RÉSULTATS ET DISCUSSION	112
6.1	Ordre de présentation	112
6.2	Résultats subjectifs.....	113
6.2.1	Niveau d'encombrement perçu	114
6.2.2	Charge mentale de travail.....	117
6.2.3	Qualités visuelles.....	118
6.2.4	Classement des écrans	119
6.3	Performance technique de vol	120
6.3.1	Durée d'une étape de vol.....	121
6.3.2	Déviati on latérale moyenne – <i>Localizer</i>	122
6.3.3	Contrôle de la déviati on latérale – <i>Localizer</i>	123
6.3.4	Déviati on verticale moyenne – <i>Glideslope</i>	124
6.3.5	Contrôle de la déviati on verticale – <i>Glideslope</i>	125
6.3.6	Activité du mini-manche en roulis	126
6.3.7	Activité du mini-manche en tangage.....	128

6.3.8	Vitesse verticale moyenne.....	129
6.3.9	Contrôle de la vitesse verticale.....	130
6.4	Parcours visuel	131
6.4.1	Visualisation du parcours visuel	131
6.4.2	Durée d'une fixation.....	135
6.4.3	Longueur d'une saccade.....	136
6.4.4	Nombre de transitions (grille 14 x 10)	137
6.4.5	Surface convexe couverte par les fixations	138
6.4.6	Fixations visuelles sur l'indicateur de déviation latérale	140
6.4.7	Fixations visuelles sur l'indicateur de déviation verticale	142
6.5	Discussion	144
6.5.1	Perception subjective.....	145
6.5.2	Performance technique de vol.....	147
6.5.3	Parcours visuel	149
6.5.4	Comparaison avec les autres études	152
CHAPITRE 7	CONCLUSION.....	154
7.1	Synthèse du travail	154
7.2	Contributions à l'avancement des connaissances.....	156
7.3	Implications pour la conception et la réglementation	157
7.4	Limites de notre recherche	159
7.5	Futures recherches.....	161
BIBLIOGRAPHIE	163
ANNEXES	180

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Documents de référence pour la conception de l'écran primaire de vol.	18
Tableau 2.1 Attributs visuels contributeurs de l'encombrement.....	33
Tableau 2.2 Métriques d'évaluation de l'encombrement d'un affichage	45
Tableau 2.3 Effet de l'encombrement sur la performance pour une tâche de prospection visuelle	58
Tableau 2.4 Effet de l'encombrement visuel sur la performance du contrôle de l'avion. Tableau adapté de (Doyon-Poulin et al., 2012).....	65
Tableau 4.1 Grille de manipulation de l'encombrement visuel	77
Tableau 5.1 Libellé des descripteurs présentés aux extrémités de l'échelle d'évaluation pour chaque facteur (tiré de (Kim et al., 2011)).	98
Tableau 5.2 Mesures sommatives de qualités visuelles et les facteurs de qualité esthétique utilisés pour les calculer (tirées de (Gannon, 2005)).	99
Tableau 6.1 Aucun effet significatif de l'ordre de présentations des PFDs n'a été observé.....	113
Tableau 6.2 Résultats de la qualité visuelle en fonction du niveau d'encombrement du PFD.....	119
Tableau 6.3 Distribution des réponses des 12 pilotes pour l'identification des écrans.....	120
Tableau 6.4 Niveau de signification de l'effet de l'encombrement visuel, de l'étape de vol, et de l'interaction entre l'encombrement et l'étape de vol sur la performance technique de vol.	121
Tableau 6.5 Nombre de couples de points utilisés pour construire la carte de visualisation du parcours visuel des trois PFDs.	132
Tableau 6.6 Effet de l'encombrement visuel sur la performance du contrôle de l'avion.	153
Tableau H.1 Ordre de présentation des écrans	197
Tableau I.2 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le niveau d'encombrement perçu.	198
Tableau I.3 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour le niveau d'encombrement perçu.	198

Tableau I.4 Résumé de la régression linéaire pour la variable dépendante : perception de l'encombrement global en fonction du niveau d'encombrement perçu.	199
Tableau I.5 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour la charge mentale de travail.	199
Tableau I.6 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour la charge mentale de travail.....	199
Tableau I.7 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour les qualités visuelles globales.....	200
Tableau I.8 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour les qualités visuelles globales.....	200
Tableau I.9 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour les qualités visuelles expressives.	200
Tableau I.10 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour les qualités visuelles expressives.	201
Tableau I.11 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour les qualités visuelles classiques.....	201
Tableau I.12 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour les qualités visuelles classiques.....	201
Tableau I.13 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour les qualités visuelles esthétiques.	202
Tableau I.14 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour les qualités visuelles esthétiques.	202
Tableau I.15 Lequel des écrans a été le plus utile pour la tâche de vol? Distribution des fréquences observées et attendues.....	203
Tableau I.16 Lequel des écrans a offert la meilleure précision de vol? Distribution des fréquences observées et attendues.	203

Tableau I.17 Lequel des écrans a été le plus encombré? Distribution des fréquences observées et attendues.....	204
Tableau I.18 Lequel des écrans a été le moins encombré? Distribution des fréquences observées et attendues.....	204
Tableau I.19 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets de la durée d'une étape de vol.....	205
Tableau I.20 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD de la durée d'une étape de vol.....	206
Tableau I.21 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour la déviation latérale moyenne.	207
Tableau I.22 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour la déviation latérale moyenne.	208
Tableau I.23 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de la déviation latérale.	209
Tableau I.24 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour le contrôle de la déviation latérale.	210
Tableau I.25 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour la déviation verticale moyenne.	211
Tableau I.26 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de la déviation verticale.	212
Tableau I.27 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour l'inclinaison moyenne du mini manche sur l'axe de roulis.....	213
Tableau I.28 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de l'inclinaison du mini manche sur l'axe de roulis.	214
Tableau I.29 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour l'inclinaison moyenne du mini manche sur l'axe de tangage.	215

Tableau I.30 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de l'inclinaison du mini manche sur l'axe de tangage.	216
Tableau I.31 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour la vitesse verticale moyenne.	217
Tableau I.32 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de la vitesse verticale moyenne.	218

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Les six instruments de vol de base. En commençant en haut à gauche : l'indicateur de vitesse, l'horizon artificiel, l'indicateur d'altitude, l'indicateur de virage, de cap, et l'indicateur de vitesse de montée (variomètre). Les quatre principaux instruments de vol (indicateur de vitesse, d'altitude, horizon artificiel et cap) ont une disposition en forme de T pour faciliter le parcours visuel dans la boucle de contrôle. Image libre de droit.	9
Figure 1.2 Écran primaire de vol (PFD) avec l'horizon artificiel (au centre), les rubans de vitesse (à gauche), d'altitude et de vitesse de montée (à droite) en plus de l'indicateur de cap (en bas). Image libre de droit.....	11
Figure 1.3 Faisceaux de guidage latéral (<i>localizer</i> , en haut) et vertical (<i>glideslope</i> , en bas) émis par les antennes de la piste équipée du système ILS. L'intersection des deux faisceaux est la trajectoire précise que doit suivre l'avion pour se poser de manière sécuritaire sur la piste. Image libre de droit.	13
Figure 1.4 L'affichage de guidage latéral et vertical est indiqué par un pointeur en losange qui glisse le long de l'échelle, jusqu'à une déviation maximale de deux points autour du chemin prescrit.	14
Figure 1.5 Symbole du FPV (en vert)	14
Figure 1.6 Le FPV suit la trajectoire prescrite par le directeur de vol.	15
Figure 1.7 Affichage tunnel superposé à l'écran primaire de vol (détails). Le vecteur de trajectoire suit le parcours prescrit par le corridor. Image libre de droit.....	16
Figure 2.1 Le même message prend une signification radicalement différente s'il (a) apparaît seul ou (b) simultanément avec d'autres messages d'alarmes.....	29
Figure 2.2 Trois représentations de terrain pour un écran SVS respectant les trois exigences de manipulation de l'encombrement.....	69
Figure 4.1 Écran HUD du Boeing 737-832 en approche à l'aéroport de San Francisco. Photo de Brett B. Despain, utilisée avec la permission de l'auteur (Despain, 2008).	80
Figure 4.2 Panneau d'instruments du Boeing 737 avec l'horizon artificiel au centre. Image libre de droits par Sol Young (CC-BY-2.0).	81

Figure 4.3 Le iPFD de Honeywell intègre l'information de différentes sources à l'écran de façon harmonieuse en effaçant la séparation entre les informations de vol (au premier plan) et le paysage (à l'arrière plan) (Honeywell, 2007).....	82
Figure 4.4 Écran PFD ayant un encombrement faible	83
Figure 4.5 Écran PFD ayant un encombrement modéré.	84
Figure 4.6 Écran PFD ayant un encombrement élevé.	85
Figure 4.7 Métrique d'encombrement global mesurée par <i>Feature Congestion</i>	87
Figure 4.8 Carte de visualisation de l'encombrement du PFD ayant un encombrement faible.....	88
Figure 4.9 Carte de visualisation de l'encombrement du PFD ayant un encombrement modéré...	89
Figure 4.10 Carte de visualisation de l'encombrement du PFD ayant un encombrement élevé. ...	90
Figure 5.1 Configuration du poste de pilotage durant l'expérimentation.	94
Figure 5.2 Géométrie du poste de pilotage par rapport aux yeux du pilote.	95
Figure 5.3 Procédure d'approche aux instruments de l'aéroport de Montréal (CYUL, Canada) pour la piste 06 gauche. Le point de capture du radiophare d'alignement de piste est <i>Xulta</i> et le repère d'approche finale est <i>Birpo</i>	102
Figure 6.1 Contribution de chaque facteur à l'encombrement visuel de l'écran. La contribution maximale théorique d'un facteur est de 33%.	114
Figure 6.2 Relation entre le niveau d'encombrement de l'écran tel qu'établi au moment de la conception et le niveau d'encombrement perçu par les participants.	115
Figure 6.3 L'échelle de niveau d'encombrement perçu développée par (Kaber et al., 2008) a bien prédit l'encombrement global jugée par les participants ($r^2 = 0.723$).	116
Figure 6.4 Charge mentale de travail mesurée avec le NASA-TLX en fonction du niveau d'encombrement de l'écran ($F_{2,22} = 8.67, p < .005$).	117
Figure 6.5 Qualité visuelle globale. Le PFD ayant un encombrement modéré a été perçu comme celui ayant la meilleure qualité visuelle ($F_{2,22} = 22.60, p < .00001$).	118
Figure 6.6 Durée moyenne pour compléter une étape de vol.....	122

Figure 6.7 Déviation latérale moyenne en fonction du niveau d'encombrement du PFD.	123
Figure 6.8 L'écran ayant un encombrement modéré a permis un meilleur contrôle de la déviation latérale durant l'approche que les deux autres écrans ($F_{2,22} = 7.84, p < .005$).	124
Figure 6.9 La déviation verticale moyenne est la même pour tous les niveaux d'encombrement de PFD. Notez la taille des barres d'incertitude, signifiant une variation importante entre les participants.	125
Figure 6.10 Contrôle de la déviation verticale en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. L'effet de l'encombrement n'a pas été significatif ($F_{2,22} = 0.36, ns$).	126
Figure 6.11 Inclinaison moyenne du mini-manche sur l'axe de roulis (en degrés) en fonction du niveau d'encombrement de l'écran.	127
Figure 6.12 Contrôle de l'inclinaison du mini-manche sur l'axe de roulis (en degrés) en fonction du niveau d'encombrement de l'écran.	128
Figure 6.13 Vitesse verticale moyenne en fonction du niveau d'encombrement de l'écran.	130
Figure 6.14 Contrôle de la vitesse verticale en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. Aucune différence significative n'a été observée entre les écrans.	131
Figure 6.15 Carte de visualisation du regard des participants utilisant l'écran faiblement encombré durant les deux étapes de vol.	133
Figure 6.16 Carte de visualisation du regard des participants utilisant l'écran modérément encombré durant les deux étapes de vol.	134
Figure 6.17 Carte de visualisation du regard des participants utilisant l'écran encombré durant les deux étapes de vol. Le code de couleur indique que les participants ont moins observé les indicateurs de déviation latérale et verticale que pour les autres écrans.	135
Figure 6.18 Durée moyenne d'une fixation en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. On remarque que la différence entre les écrans a été plus importante pour la seconde étape de vol.	136
Figure 6.19 Longueur moyenne d'une saccade. Celle-ci a été la plus longue pour l'écran ayant un encombrement élevé. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.	137

Figure 6.20 Nombre de transitions des fixations d'une zone de l'écran à une autre en appliquant une grille de 14 x 10 zones. Le niveau d'encombrement n'a pas influencé le nombre de transitions.	138
Figure 6.21 Vue des limites de la surface convexe (en trait rouge) couverte par les fixations visuelles (les croix jaunes) pour les écrans ayant un encombrement faible et un encombrement élevé. Les données sont celles du pilote 9 durant une répétition de l'approche et couvrent les deux étapes de vol.	139
Figure 6.22 Surface convexe couverte par les fixations visuelles en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Le regard des participants a couvert une plus grande surface avec l'écran encombré. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.	140
Figure 6.23 Nombre cumulatif de fixations visuelles sur l'indicateur de déviation latérale en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.	141
Figure 6.24 Temps cumulatif de fixations visuelles sur l'indicateur de déviation latérale en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.	142
Figure 6.25 Nombre cumulatif de fixations visuelles sur l'indicateur de déviation verticale en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.	143
Figure 6.26 Temps cumulatif de fixation visuelle sur l'indicateur de déviation verticale en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.	144

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET GLOSSAIRE

AC	<i>Advisory circular</i> ; circulaire publiée par la FAA suggérant des méthodes de certification et des exemples d'implémentation pour démontrer qu'un avion est conforme au règlement aérien. Le numéro de l'AC fait référence au règlement couvert par la circulaire.
ADI	<i>Attitude display indicator</i> ; horizon artificiel. Instrument de vol indiquant l'angle de tangage et de roulis de l'appareil par rapport à l'horizon.
CAS	<i>Crew alerting system</i> ; système d'alerte de l'équipage. Bref message décrivant l'apparition d'une défaillance, faute ou opération anormale d'un système de l'avion.
EVS	<i>Enhanced vision system</i> ; système de vision améliorée. Présente une vue instantanée à l'extérieur de l'avion, capable de percer le couvert nuageux et la faible luminosité. Utilise un capteur installé à l'avant de l'avion (ex. caméra infrarouge).
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> ; organisme fédéral américain responsable de la réglementation du transport aérien. D'autres autorités de certification telles que Transport Canada peuvent se baser sur les consignes de la FAA s'il n'y a pas de réglementation spécifique à ce sujet.
FD	<i>Flight director</i> ; directeur de vol. Symbole présenté sur le PFD indiquant le parcours que doit suivre l'avion pour assurer son guidage. Le signal peut provenir de différentes sources (ILS, gestionnaire de plan de vol, etc.).
FPV	<i>Flight path vector</i> ; vecteur de trajectoire. Symbole présenté sur le PFD indiquant la trajectoire actuelle de l'avion sur l'axe de tangage et de route. Il est calculé par la somme de toutes les forces exercées sur l'avion.
FTE	<i>Flight technical error</i> ; erreur technique de vol. Déviation en position ou en vitesse de l'avion par rapport au plan de vol prescrit. La valeur est rapportée comme la déviation moyenne mesurée durant l'essai en simulateur.
G/S	<i>Glideslope</i> ; Alignement de descente. Trajectoire de descente verticale de l'appareil par rapport à la piste d'atterrissage, indiquée par la combinaison d'équipements au sol et d'instruments embarqués.

HDD	<i>Head down display</i> ; affichage tête basse. Le pilote doit se pencher la tête pour lire l’affichage, son regard quittant la vue extérieure. Le PFD est un affichage tête basse.
HUD	<i>Head up display</i> ; affichage tête haute. La symbologie est affichée sur un verre optique permettant de superposer les symboles de vol à la vue extérieure.
IHM	Interaction humain-ordinateur.
ILS	<i>Instrument landing system</i> ; système d’atterrissage aux instruments. Un appareil équipé du système ILS peut réaliser son approche sans contact visuel de la piste. Le système fournit les informations d’alignement de descente et de radiophare d’alignement de piste. Pour l’utiliser, le pilote doit avoir une certification de vol aux instruments.
IMC	<i>Instrument meteorological conditions</i> ; conditions météorologiques de vol aux instruments. Les conditions météorologiques ne permettent pas au pilote de voler en visuel. Pour voler en conditions IMC, le pilote doit avoir une qualification de vol aux instruments et son appareil doit être équipé des instruments nécessaires.
LOC	<i>Localizer</i> ; radiophare d’alignement de piste. C’est la trajectoire latérale de l’appareil par rapport à la piste d’atterrissage, indiquée par la combinaison d’équipements au sol et d’instruments embarqués.
OACI	Organisation de l’aviation civile internationale. Agence spécialisée de l’Organisation des Nations Unies (ONU) chargée de l’élaboration des normes permettant la standardisation du transport aéronautique international. Son siège social est basé à Montréal.
PFD	<i>Primary flight display</i> ; écran primaire de vol présentant sur un seul affichage les informations nécessaires au pilotage de l’appareil (vitesse, altitude, angle de tangage, de roulis et de lacet, compas et variomètre).
SAE	<i>Society of automotive engineers</i> . Société savante à l’origine de plusieurs guides de bonnes pratiques pour les milieux automobile et aérospatial. L’organisme a changé sa dénomination en 2006 pour SAE International.
SVS	<i>Synthetic vision system</i> ; système de vision synthétique. Reproduction 3D à l’écran du terrain au voisinage de l’avion. Utilise une base de données topographiques

embarquée dans l'avion et la coordonnée actuelle de l'appareil pour recréer un affichage en perspective égocentrique sur un affichage tête haute ou tête basse.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A CERTIFICAT DE CONFORMITÉ ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC DES SUJETS HUMAINS	180
ANNEXE B MESSAGE DE SOLlicitATION À L'INTENTION DES PILOTES.....	181
ANNEXE C FORMULAIRE DE CONSENTEMENT À LA RECHERCHE	183
ANNEXE D QUESTIONNAIRE BIOGRAPHIQUE	187
ANNEXE E NASA-TLX	188
ANNEXE F ÉVALUATION DE L'ENCOMBREMENT VISUEL	191
ANNEXE G QUALITÉS VISUELLES.....	195
ANNEXE H ORDRE DE PRÉSENTATION DES PFDS	197
ANNEXE I RÉSULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES	198
ANNEXE J AUTORISATION D'UTILISATION DES PHOTOGRAPHIES	219

INTRODUCTION

Le matin du 17 décembre 1903, par un jour de grand vent à Kitty Hawk dans l'état de la Caroline du Nord, Orville Wright réalisa le premier vol contrôlé à bord d'un avion motorisé. L'avion parcourra la distance de 150 mètres et le vol ne dura que 12 secondes. Plus tard durant la même journée, son frère Achille Wright s'envola à son tour à bord de l'appareil et franchit 850 mètres en 59 secondes. L'avion des frères Wright n'était équipé d'aucun instrument de vol; l'unique pièce électromécanique à bord était le magnéto nécessaire pour le fonctionnement du moteur. Les frères Wright, conscients de la prouesse technique qu'ils venaient d'accomplir, ne pouvaient se douter de la croissance marquée de l'industrie aéronautique dans le siècle suivant. En 2012, l'aviation civile a réalisé plus de 30 millions de vols et a transporté près de 3 milliards de passagers (OACI, 2013). La croissance de l'aviation civile s'accélérera dans les prochaines années. L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) prévoit que le nombre de vols doublera d'ici 2030 pour atteindre 60 millions par année, une croissance tirée par les marchés émergents (OACI, 2013). Cette croissance accélérée de l'aviation civile entraîne une complexification des instruments de vol et de la tâche du pilote afin de compléter le vol en sûreté et dans les temps prescrits. Dans ce contexte, optimiser l'ergonomie des instruments de vol se révèle donc un sujet de recherche pertinent et d'actualité.

L'émergence de l'étude des facteurs humains comme discipline scientifique s'est faite de manière parallèle à la croissance de l'aviation (Edwards, 1988). D'abord considérée comme une discipline visant à « corriger » les caractéristiques du poste de pilotage pour qu'elles respectent les limitations humaines (Koonce & Debons, 2010), l'étude des facteurs humains fait maintenant partie intégrante du processus de conception de l'avion afin que le poste de pilotage, ses contrôles et ses instruments de vol facilitent la tâche du pilote. La définition qu'offre (Koonce, 1979) des facteurs humains en aviation reflète l'apport de la discipline dans la conception de l'avion :

« Human factors in aviation are involved in the study of human's capabilities, limitations, and behaviours, as well as the integration of that knowledge into the systems that we design for them to enhance safety, performance, and general well-being of the operators of the systems. »

Aujourd'hui, l'objet d'étude des facteurs humains en aviation a dépassé celui du poste de pilotage et ses commandes pour intégrer la collaboration entre les membres d'équipage, la charge mentale

de travail, la conscience de la situation, l'automatisation des systèmes et la gestion de l'espace aérien (Koonce & Debons, 2010).

Une problématique qui fait l'objet de recherche active en facteurs humains depuis le début de l'aviation civile jusqu'à nos jours est l'affichage des instruments de vol et leur intégration à la tâche du pilote (Curtis, Jentsch, & Wise, 2010). Cette problématique prend tout son sens lorsque l'on considère l'arrivée au tournant du XXI^e siècle de la nouvelle génération de système d'affichage – *glass-cockpit*, en anglais – qui a remplacé le tableau de bord composé d'indicateurs électromécaniques par des écrans numériques. Cette avancée technologique offre la possibilité d'afficher au pilote plus d'information de vol que les systèmes précédents. Toutefois, un tel écran serait visuellement chargé – il serait décrit comme ayant un niveau d'*encombrement visuel* élevé – et le pilote devrait continuellement filtrer l'information dont il a besoin.

Cette thèse de doctorat porte sur l'optimisation de l'encombrement visuel de l'affichage primaire de vol¹ présenté au pilote dans le poste de pilotage. Plus particulièrement, cette thèse étudie l'effet d'un accroissement de l'encombrement visuel de l'affichage de vol sur la performance du pilote. L'hypothèse de recherche est qu'un écran ayant un niveau d'encombrement modéré offre une meilleure performance au pilote qu'un écran ayant un niveau d'encombrement faible ou élevé.

La recherche a été réalisée en partenariat avec le groupe de facteurs humains de Bombardier Aéronautique à Montréal. Le partenariat avec Bombardier Aéronautique offre une opportunité unique pour permettre une étude sur le terrain de la conception d'affichages complexes pour le poste de pilotage, en plus de permettre l'accès à des pilotes experts afin de réaliser des tests de performance en simulateur de vol. C'est le souhait de l'auteur de ce travail que les connaissances sur l'encombrement visuel tirées de cette thèse serviront dans le travail de l'équipe des facteurs humains durant la conception d'affichages afin de faciliter leur compréhension par le pilote, et ainsi offrir une meilleure performance en vol. Cette recherche contribue aussi à l'avancement des connaissances en énonçant formellement les exigences que doivent respecter les affichages testés durant une expérience sur l'encombrement visuel.

¹ Se référer au chapitre 1.2 pour une définition de l'affichage primaire de vol et des instruments de vol du poste de pilotage.

Optimiser l'encombrement visuel des écrans du poste de pilotage est une problématique stimulante qui se démarque des études précédentes de l'encombrement visuel des affichages-écrans réalisées en interaction humain-machine, et ce, pour quatre raisons. Premièrement, la tâche de pilotage de l'avion est une tâche réelle, complexe, et réalisée dans un contexte où la sûreté des opérations est un facteur critique de performance. Deuxièmement, les pilotes – la population d'utilisateurs étudiée – sont des experts dans leur domaine. Ils ont reçu une formation étendue et comptent plusieurs années d'expérience. Cela n'est pas sans conséquence sur l'utilisation qu'un pilote fait de l'information sur un écran : contrairement à un utilisateur novice, l'expert sait où regarder pour extraire l'information pertinente et s'attend à une modalité connue de présentation de l'information. Troisièmement, la conception des affichages dans le milieu de l'aviation est règlementée par les autorités compétentes en transport, qui exigent de minimiser l'encombrement visuel présenté au pilote. Ces exigences contraignent l'espace-solution pour la conception d'écran et limitent le nombre de solutions disponibles pour optimiser l'encombrement. Quatrièmement, cette étude est une étude de terrain réalisée au sein de l'équipe de facteurs humains de Bombardier Aéronautique. Cette opportunité offre une vision privilégiée sur le cycle de conception et de validation des écrans dans un environnement de travail réel, soumis à des contraintes de temps, de ressources et de réglementations.

La thèse est structurée comme suit : le premier chapitre présente les besoins du milieu de pratique dans lequel la recherche a été réalisée, les affichages du poste de pilotage et les règlements des autorités de transport concernant la conception des instruments de vol et plus particulièrement l'encombrement visuel des écrans. Le deuxième chapitre présente une revue des connaissances sur l'encombrement visuel des écrans dans la conception d'interfaces humain-machine, avec une revue systématique des définitions de l'encombrement, une comparaison critique des métriques existantes pour évaluer l'encombrement d'un écran et une revue des effets de l'encombrement sur la performance humaine. Le chapitre se termine en énonçant les trois exigences que doivent respecter les affichages durant l'étude de l'encombrement visuel. Le troisième chapitre présente la problématique, les objectifs et les hypothèses de recherche retenues pour cette thèse. Le quatrième chapitre présente la méthode de conception de trois nouveaux affichages avec un niveau d'encombrement visuel différent. Ce chapitre met en application les éléments contribuant à l'encombrement visuel identifiés durant la revue de littérature. Ces affichages sont utilisés dans l'étude expérimentale de cette thèse. Le cinquième chapitre présente la méthodologie employée

pour réaliser l'étude en simulateur de vol complétée durant cette thèse, en détaillant la méthode d'analyse de données employée. Le sixième chapitre présente les résultats de l'expérience et leur analyse, de même que les recommandations pour l'optimisation de l'encombrement visuel dans la conception d'interfaces qui découlent des résultats expérimentaux. Le septième chapitre présente les conclusions de ce travail, en mettant en évidence les contributions originales réalisées durant cette thèse, les principaux résultats obtenus en expérience, et les pistes de recherche pour les prochains travaux.

CHAPITRE 1 BESOINS DU MILIEU DE PRATIQUE, PRINCIPAUX INSTRUMENTS DE VOL ET RÉGLEMENTATION AÉRIENNE

Ce chapitre décrit les besoins du milieu de pratique concernant l'analyse de l'encombrement visuel des affichages de vol. Ensuite, il présente de façon détaillée les affichages et les instruments de vol du poste de pilotage, car il s'agit de l'objet de cette étude. Finalement, il montre les extraits des règlements aériens pertinents sur l'optimisation de l'encombrement visuel des affichages de vol. Ce dernier point met en évidence la pertinence de l'étude de l'encombrement visuel.

1.1 Besoins du milieu de pratique

Cette recherche s'est réalisée en partenariat avec l'équipe de facteurs humains de Bombardier Aéronautique, ci-après référée comme le milieu de pratique. Les ergonomes du milieu de pratique ont formulé trois besoins nécessitant plus de recherche au sujet de l'encombrement visuel des affichages de vol. Le premier besoin est de développer une meilleure compréhension des effets de l'encombrement visuel sur la performance du pilote. On sait que l'encombrement visuel diminue la performance humaine pour une tâche de prospection visuelle, mais est-ce que la diminution de performance est similaire pour toutes les tâches? Au Chapitre 2, nous montrons que l'effet de l'encombrement visuel sur la performance dépend de la tâche réalisée.

Le second besoin exprimé par le milieu de pratique est d'avoir accès à une méthode d'évaluation quantifiée et reproductible de l'encombrement visuel. Une telle méthode offre trois intérêts pour les professionnels du milieu de pratique. Premièrement, il serait possible d'évaluer rapidement l'encombrement d'un même écran à plusieurs reprises durant la phase de conception, ou encore de comparer ses écrans avec les références du marché. Deuxièmement, une telle méthode permettrait d'évaluer de façon cohérente le même ensemble d'attributs entre différents écrans. Troisièmement, l'évaluation quantifiée offre une source d'objectivité dans la discussion entre les parties prenantes (concepteur, pilote, ingénieur, fournisseur, etc.) sur les mérites d'un écran et les compromis réalisables pour optimiser son encombrement. La section 2.3 présente une revue des métriques d'évaluation de l'encombrement des écrans et les applique aux affichages du poste de pilotage.

Le besoin d'une méthode d'évaluation est pertinent pour le milieu de pratique, car les organismes réglementaires en aéronautique exigent que l'écran présente un encombrement visuel minimal pour que celui-ci soit certifié apte au vol². C'est d'ailleurs pour cette raison que l'équipe de facteurs humains s'est montrée intéressée par notre recherche.

Le troisième besoin exprimé par le milieu de pratique est de proposer des lignes directrices pour réduire l'encombrement visuel des affichages. Ce besoin a un impact concret sur le travail de conception des affichages. En effet, les organismes réglementaires exigent de minimiser l'encombrement visuel des affichages. Or, quels éléments ou groupes d'éléments contribuent à charger un écran? Au Chapitre 4, nous proposons une grille de manipulation de l'encombrement visuel et au Chapitre 6, nous formulons trois recommandations pour réduire l'encombrement d'un affichage basé sur les résultats expérimentaux obtenus en simulateur de vol.

La prochaine section présente les principaux instruments de vol du poste de pilotage utilisés par le pilote pour contrôler l'appareil. Cette présentation est importante car le sujet de cette étude est l'optimisation de l'encombrement de l'écran primaire de vol.

1.2 Affichage des instruments de vol

Les premiers pionniers de l'aviation pilotaient leur appareil *en visuel*, c'est-à-dire en se fiant à des indices de l'environnement extérieur pour estimer la trajectoire de l'avion, sa vitesse et son altitude. Ces vols étaient aussi de courte durée, survolant un territoire connu du pilote. Or, le besoin s'est rapidement fait sentir pour des instruments de vol à bord du poste de pilotage lors de vols de plus longue distance ou lorsque les conditions météorologiques étaient défavorables.

La lecture des instruments de vol dans le poste de pilotage est la source d'information primaire du pilote pour connaître l'état actuel et futur de l'appareil, de même que sa trajectoire (du Puy de Goyne, Plays, Lepourry, & Besse, 2010). Du Puy de Goyne et ses collègues (2010) recensent trois grandes familles d'instruments de vol : les instruments de conduite qui permettent le pilotage de l'appareil; les instruments de contrôle du moteur et des systèmes; et les instruments

² La réglementation est expliquée en détails à la section 1.3.

de navigation et de communication radio. Dans ce travail, nous étudions principalement les instruments de conduite à cause de leur rôle primordial dans la gestion de la trajectoire.

L’affichage des instruments de vol a connu une transformation technologique majeure depuis le début de l’aéronautique, passant de l’ère des appareils électromécaniques où chaque paramètre est indiqué par son instrument dédié, à l’ère des appareils électro-optiques utilisant de larges écrans d’ordinateur dont l’information affichée est reconfigurable par le pilote (Liggett, 2010). Le passage aux affichages numériques est aussi associé à une augmentation de la quantité d’information que l’on peut présenter au pilote, reflétant une augmentation de la complexité des systèmes. À l’ère des appareils électromécaniques, l’espace disponible sur le tableau de bord est devenu le facteur limitatif du nombre d’instruments de vol visibles au pilote; certains postes de pilotages comptaient jusqu’à 100 cadrans et les concepteurs ont dû réduire la taille des nouveaux instruments afin de les loger sur le tableau de bord (Liggett, 2010). Au contraire, un affichage numérique permet au pilote de sélectionner différentes sources d’information qu’il est possible d’afficher successivement sur un seul écran. Le changement de technologie d’affichage a aussi produit un changement radical dans les modes de présentation de l’information de vol : l’arrivée de l’écran primaire de vol (*Primary flight display – PFD*) intègre sur un seul affichage l’information de vol autrefois présentée sur six cadrans séparés (Curtis et al., 2010). L’intégration des sources d’informations et leur présentation sur l’écran primaire de vol font l’objet de recherche active en aéronautique afin de présenter au pilote une information pertinente pour la tâche de vol. Ce doctorat s’ajoute à ce lot de recherche en étudiant l’encombrement visuel de l’écran primaire de vol.

Le reste de cette section présente les instruments de vol du poste de pilotage, afin de bien comprendre la problématique de l’encombrement visuel de l’écran primaire de vol. Elle débute en présentant les instruments hérités de l’ère électromécanique qui sont à l’origine de l’écran primaire de vol, avant de présenter en détails le PFD. La présentation des fonctions de guidage suit.

1.2.1 Les instruments de base: le *Basic-T*

En 1937, l’armée de l’air britannique a identifié les six instruments de vol de base nécessaires pour réaliser un vol sécuritaire en conditions météorologiques (IMC), c’est-à-dire sans visibilité à l’extérieur de la cabine (Williamson, 1937). Il s’agit de l’horizon artificiel, l’indicateur de vitesse,

d'altitude, de virage, de montée (variomètre) et de cap. La Figure 1.1 présente ces six instruments de base dans leur disposition standard que l'on retrouve encore aujourd'hui à bord des appareils motorisés légers.

L'horizon artificiel occupe le centre du tableau de bord à cause de son rôle primordial dans le contrôle de l'assiette de l'avion, soit le contrôle de l'orientation de l'appareil par rapport au sol. L'horizon artificiel est une sphère roulante représentant la terre en brun et le ciel en bleu, l'interface entre les deux éléments étant la ligne d'horizon. La position des ailes de l'avion est fixe sur l'instrument; l'avion est donc le référentiel fixe alors que l'horizon se déplace (Wickens, 1986). L'instrument indique l'angle de tangage et de roulis, tous les deux en degrés, qui sont respectivement l'inclinaison autour de l'axe transversal et longitudinal de l'appareil (du Puy de Goyne et al., 2010).

L'indicateur de vitesse, à gauche de l'horizon artificiel, donne la *vitesse indiquée* en nœud³. Le pilote utilise l'indicateur de vitesse à toutes les phases de vol, de la vitesse de rotation au décollage jusqu'à la vitesse d'approche pour l'atterrissage. Les différents régimes de vitesse sont délimités par un code de couleur sur le cadran (voir Figure 1.1).

L'indicateur d'altitude, à droite de l'horizon artificiel, donne la lecture d'altitude en pied. Cette valeur est obtenue par une mesure de la pression atmosphérique statique à l'extérieur de l'appareil. Le pilote ajuste la pression de référence, par exemple la pression à l'aéroport, à l'aide du bouton de calage à côté du cadran⁴.

³ La *vitesse indiquée* est la vitesse à laquelle se déplace l'avion par rapport au vent. Elle ne tient pas compte de la correction pour la vitesse du vent (*vitesse du sol*), ni de la correction en fonction de l'altitude (*vitesse propre*) (du Puy de Goyne, Plays, Lepourry, & Besse, 2010).

⁴ En ajustant le calage altimétrique sur la pression atmosphérique à l'aéroport, l'altimètre indique la hauteur de l'avion. En l'ajustant sur la pression au niveau de la mer, l'altimètre donne l'altitude de l'avion. Pour se conformer aux règles de circulation aériennes, à partir d'une certaine altitude tous les avions utilisent la pression d'atmosphère standard de 29,92 pouces de mercure (Macdonald, 1991).



Figure 1.1 Les six instruments de vol de base. En commençant en haut à gauche : l'indicateur de vitesse, l'horizon artificiel, l'indicateur d'altitude, l'indicateur de virage, de cap, et l'indicateur de vitesse de montée (variomètre). Les quatre principaux instruments de vol (indicateur de vitesse, d'altitude, horizon artificiel et cap) ont une disposition en forme de T pour faciliter le parcours visuel dans la boucle de contrôle. Image libre de droit.

L'indicateur de cap, situé sous l'horizon artificiel, donne la valeur de cap en degrés prise par l'avion. Comme pour l'horizon artificiel, l'avion est le référentiel fixe sous lequel se déplace la rose.

Ces quatre instruments offrent l'information minimale pour le maintien de l'avion en vol, le variomètre et l'indicateur de virage offrant une information optionnelle de tendance. La disposition de ces quatre instruments est en forme de T, c'est pourquoi l'on réfère à ces instruments comme le T de base (*basic-T*, en anglais). Cette disposition facilite la lecture des cadrans, avec l'information primaire de l'horizon artificiel au centre et les autres instruments en périphérie (Emeyriat, 1997). La disposition en T a fait l'objet de plusieurs raffinements dans le développement de l'ergonomie des instruments de vol et s'est fixée après une étude extensive

menée par l'armée de l'air américaine (Liggett, 2010). La disposition en T est désormais standardisée et à la base de la conception de l'affichage primaire de vol.

1.2.2 Affichage primaire de vol

L'affichage primaire de vol (*primary flight display*, PFD) a remplacé le panneau d'instruments de vol et les différents affichages du *basic-T* par un seul écran numérique. Le PFD a permis de faciliter la tâche de pilotage, le pilote n'ayant plus qu'à observer un écran pour obtenir toute l'information sur la conduite de l'appareil plutôt que devoir surveiller six cadrans individuels.

La disposition du PFD reproduit celle du T de base (voir Figure 1.2). L'horizon artificiel est affiché au centre de l'écran et présente une échelle de l'angle de tangage et de roulis semblable à son équivalent mécanique, en plus d'afficher l'angle de lacet (rotation autour de l'axe verticale). L'indicateur de vitesse, à gauche, et l'altimètre, à droite, encadrent l'horizon artificiel. Ces affichages sont désormais en forme de ruban vertical avec une fenêtre de lecture de la valeur (*digital readout*). Ce nouvel affichage facilite la lecture de valeur. En effet, la lecture de l'altimètre à trois aiguilles nécessite 3,9 secondes et comportait un taux d'erreur de 20%, alors que la lecture de l'altimètre numérique ne requiert que 1,3 secondes et a un taux d'erreur nul (voir (Emeyriat, 1997)). L'indicateur de cap est sous l'horizon artificiel et fonctionne comme un indicateur de cap magnétique. Il peut toutefois afficher des informations supplémentaires de direction fournies par le système de gestion de plan de vol (*Flight management system – FMS*).

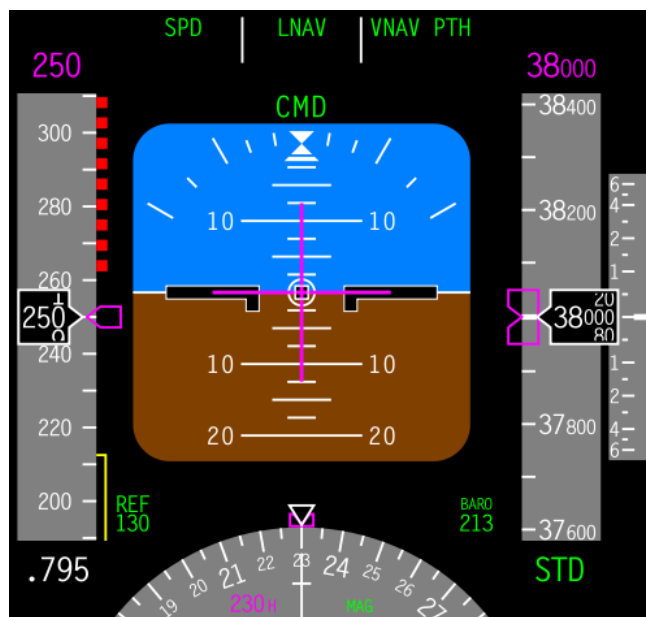


Figure 1.2 Écran primaire de vol (PFD) avec l'horizon artificiel (au centre), les rubans de vitesse (à gauche), d'altitude et de vitesse de montée (à droite) en plus de l'indicateur de cap (en bas). Image libre de droit.

Contrairement aux instruments à cadrans, le PFD affiche une information dynamique fournie par les ordinateurs de vol, ce qui lui offre plusieurs avantages. Le PFD affiche les marqueurs de vitesse mis à jour en fonction de la configuration de l'avion, comme par exemple le marqueur de vitesse pour l'ouverture des volets ou la vitesse de décrochage. Le PFD offre aussi différents modes de communication pour avertir l'équipage de l'état inhabituel de l'appareil : changer la couleur de la valeur si elle est hors norme (p. ex. le ruban de vitesse devient rouge s'il approche de la vitesse de décrochage), afficher un message d'avertissement à l'écran (p. ex. « STALL » lorsque l'avion décroche), et offrir des alertes auditives pour attirer l'attention de l'équipage.

Toutefois, le principal intérêt du PFD est sa capacité d'afficher les fonctions de guidage de vol (*flight guidance*) superposées sur l'horizon artificiel, facilitant d'autant le contrôle précis de l'appareil par le pilote et le respect du plan de vol.

1.2.3 Fonctions de guidage de vol

La fonction de guidage de vol indique au pilote le chemin qu'il doit emprunter pour suivre avec précision son plan de vol. On distingue deux familles de fonctions de guidage. Les commandes de correction affichent l'écart entre la position actuelle de l'avion et la trajectoire qu'il doit

emprunter. En ce sens, cette famille de commandes agit comme un système en boucle fermée de minimisation de l'erreur offrant peu d'information pour anticiper la réaction de l'appareil aux commandes. Les systèmes de directeur de vol (*Flight director – FD*) et de vol aux instruments (*Glideslope – Localizer*) appartiennent à cette famille. Les commandes d'anticipation affichent le parcours que doit suivre l'avion dans l'espace. Cette famille de commandes offre une meilleure conscience de la situation au pilote en lui permettant de se représenter spatialement son environnement et d'anticiper les prochaines commandes de vol. Le système de tunnel (*Tunnel-in-the-sky*) appartient à cette famille.

Cette section présente les affichages des commandes de guidage de vol pour le système d'atterrissage aux instruments (*Glideslope – Localizer*), le vecteur de trajectoire et le directeur de vol (*Flight path vector – Flight director*), et le système de tunnel. Elle est importante pour le reste du travail pour deux raisons: afin de bien comprendre les limites des études précédentes sur l'encombrement visuel du PFD, et parce que dans l'expérience présentée au Chapitre 5 les pilotes utiliseront un système d'atterrissage aux instruments.

1.2.3.1 Système d'atterrissage aux instruments

Le système d'atterrissage aux instruments (*Instrument landing system – ILS*) est utilisé en phase d'approche afin que l'avion soit en ligne avec la piste d'atterrissage. Il consiste en deux systèmes, le premier offrant un guidage latéral de la piste (*Localizer*) et le second offrant un guidage vertical (*Glideslope*). Le guidage vertical permet une approche en douceur de l'avion avec un angle de descente de 3°.

L'utilisation de ce système requiert que la piste soit équipée d'antennes d'émission de guidage latéral et vertical qui émettent chacune un faisceau de guidage précis (voir Figure 1.3). L'intersection de ces deux faisceaux est la trajectoire que doit suivre l'avion pour se poser de manière sécuritaire sur la piste.

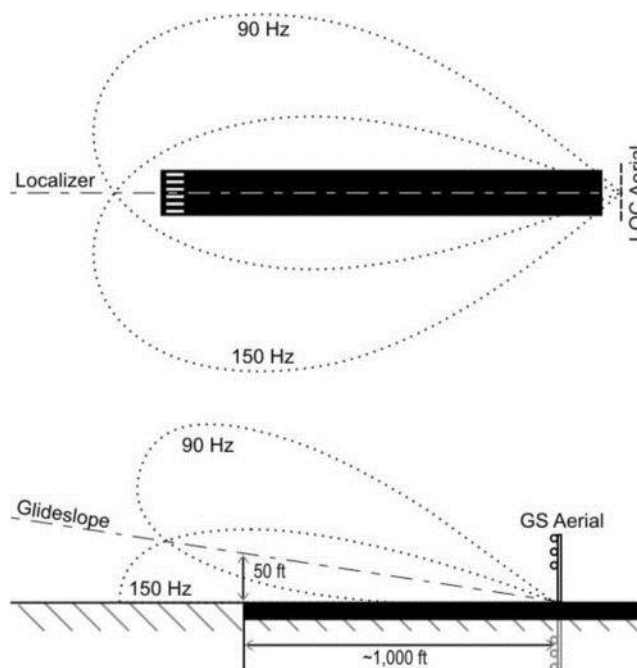


Figure 1.3 Faisceaux de guidage latéral (*localizer*, en haut) et vertical (*glideslope*, en bas) émis par les antennes de la piste équipée du système ILS. L'intersection des deux faisceaux est la trajectoire précise que doit suivre l'avion pour se poser de manière sécuritaire sur la piste. Image libre de droit.

L'information de guidage latéral et vertical est affichée sur deux échelles, l'une horizontale et l'autre verticale, respectivement situées de part et d'autre de l'horizon artificiel (voir Figure 1.4). Ces échelles sont composées d'un pointeur en losange qui glisse le long de l'échelle. Le pointeur est au centre de l'échelle lorsque l'appareil suit le faisceau de guidage. L'échelle affiche une déviation maximale de deux points au-dessus et deux points au-dessous du faisceau de guidage. Selon les standards de tests de la FAA, un avion ne devrait pas excéder une déviation d'un point pour le guidage latéral ou vertical en phase d'approche (Flight Standards Service, 2008)

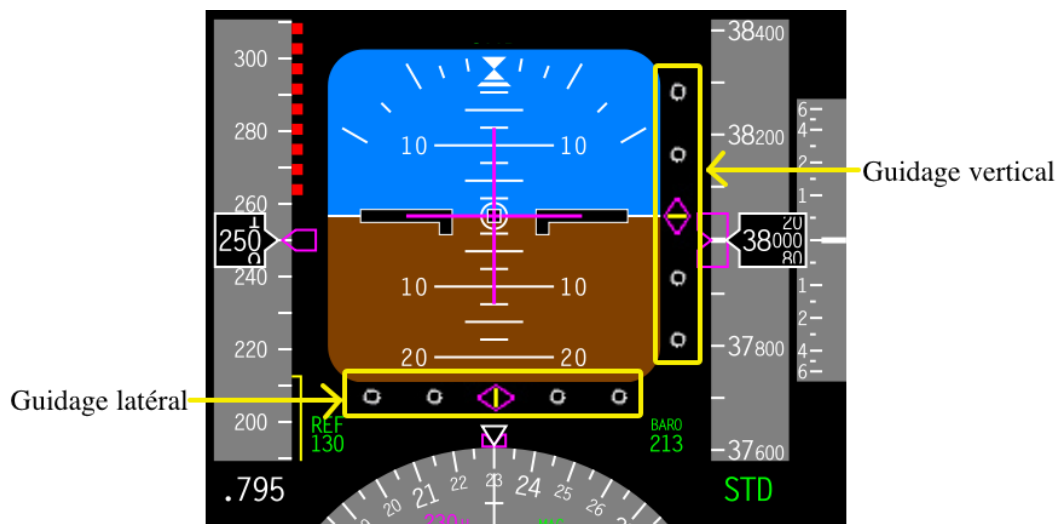


Figure 1.4 L'affichage de guidage latéral et vertical est indiqué par un pointeur en losange qui glisse le long de l'échelle, jusqu'à une déviation maximale de deux points autour du chemin prescrit.

1.2.3.2 Vecteur de trajectoire et directeur de vol

Le vecteur de trajectoire (*Flight path vector – FPV*) indique la trajectoire latérale et verticale de l'avion résultant de la somme de toutes les forces s'exerçant sur l'avion. Sa valeur est calculée par les ordinateurs de vol à bord de l'appareil. Le FPV est présenté sur le PFD sous la forme d'un petit symbole représentant l'avion vu de dos (voir Figure 1.5). Par exemple, un avion avec une altitude stable a son symbole FPV sur la ligne d'horizon du PFD, même s'il a un angle de tangage positif.

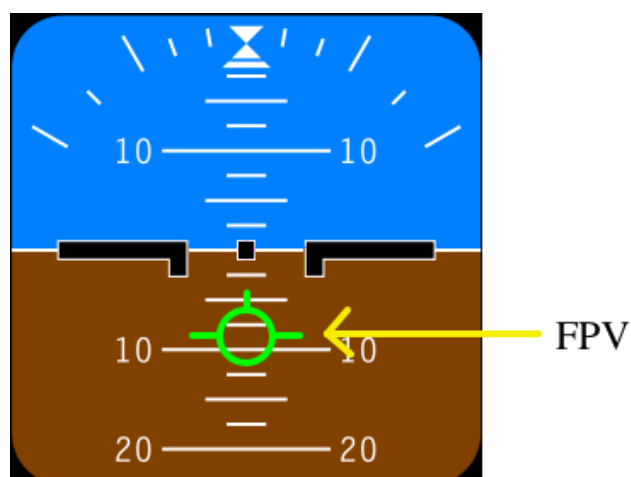


Figure 1.5 Symbole du FPV (en vert)

Le FPV est souvent utilisé avec le directeur de vol (*Flight director – FD*). Ce dernier donne les indications de guidage latéral et vertical obtenu par le gestionnaire de plan de vol et le pilote automatique. Le pilote doit réaliser les commandes de tangage et de roulis nécessaires afin que le symbole de FPV se superpose au symbole de FD à l'écran. En tel cas, l'avion suit le parcours prescrit du plan de vol avec précision. Le symbole conventionnel du FD est semblable à celui du FPV mais avec des ailes allongées, de telle façon que lorsque les deux indicateurs se superposent, il ne forme plus qu'un symbole à l'écran (voir Figure 1.6).

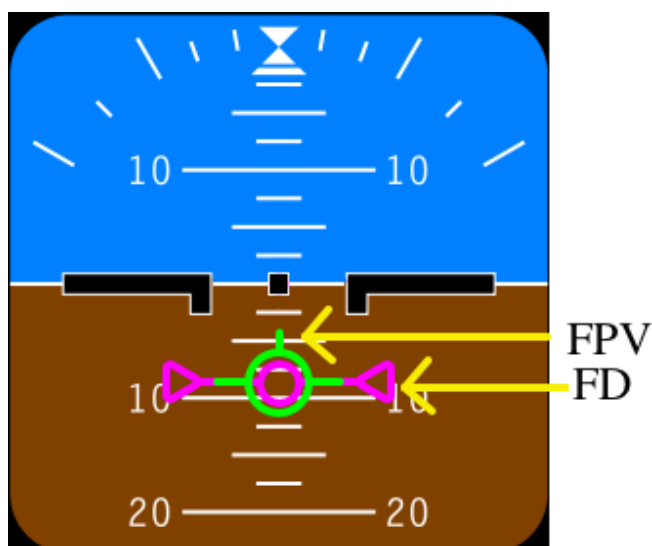


Figure 1.6 Le FPV suit la trajectoire prescrite par le directeur de vol.

Les deux systèmes de guidage présentés précédemment ont pour avantage de donner une indication précise de l'écart entre la position actuelle de l'avion par rapport à son trajet prescrit; dans le premier cas cet écart est donné par la déviation du losange de la ligne centrale et dans le second par l'écart du FPV du FD. Toutefois, ces systèmes offrent peu d'information pour anticiper les prochaines commandes, par exemple durant un virage courbe, ou pour projeter l'état futur de l'appareil suivant une commande. C'est à cette lacune que s'adresse la seconde famille de commandes de guidage, et plus particulièrement le système de tunnel.

1.2.3.3 Tunnel (*Tunnel-in-the-sky*)

L'affichage de tunnel (*tunnel-in-the-sky*) superposé à l'écran primaire de vol présente une vue spatiale de la trajectoire à suivre par une série de rectangles délimitant le corridor de vol (voir Figure 1.7). Le pilote contrôle l'avion afin que le symbole de vecteur de trajectoire soit toujours à

l'intérieur de ce corridor. Contrairement aux affichages de correction présentés précédemment, l'affichage de tunnel présente le *déplacement* de l'avion dans son environnement avec une vue 3D. Il permet aussi au pilote *d'anticiper* la séquence d'actions à venir en projetant dans l'espace le parcours prédit de l'avion, une information absente des affichages de correction (Mulder, van Paassen, & Mulder, 2004). De tels affichages améliorent la conscience de la situation (Dorigi, Ellis, & Grunwald, 1991; Parrish, Busquets, Williams, & Nold, 1994) et permettent de suivre la trajectoire de vol en contrôle manuel avec une grande précision (Grunwald, Robertson, & Hatfield, 1980; Grunwald, 1984). Plusieurs études ont montré que l'affichage de tunnel est un facteur majeur dans le gain de performance du pilote, particulièrement dans la précision du contrôle du vol (Bailey, Kramer, & Prinzl III, 2006; Prinzl III, Arthur III, Kramer, & Bailey, 2004; Prinzl, Kramer, Arthur, Bailey, & Comstock, 2004).



Figure 1.7 Affichage tunnel superposé à l'écran primaire de vol (détails). Le vecteur de trajectoire suit le parcours prescrit par le corridor. Image libre de droit.

1.2.4 Synthèse

Cette section a présenté les principaux instruments de vol du poste de pilotage et leurs affichages. Elle a aussi présenté l'évolution des affichages, de l'ère des cadrans à celle des écrans numériques et de l'affichage de tunnel. Ces connaissances seront utilisées dans le Chapitre 2 sur la revue de littérature des expériences passées de l'encombrement visuel des affichages de vol.

Nous montrerons que certaines études ont mal isolé la variable d'encombrement visuel en manipulant à la fois l'encombrement et la fonction de guidage.

La conception de l'affichage des instruments de vol présentés dans cette section est soumise à des règles et des exigences de la part des autorités réglementaires. La prochaine section en dresse la liste.

1.3 Organismes réglementaires

La sécurité des opérations aériennes est centrale dans la conception et la certification des avions. L'affichage des instruments de vol ne fait pas exception à cette règle, et plusieurs documents rédigés par les autorités réglementaires compétentes en transport aérien énoncent les exigences que tous les affichages doivent respecter. Ces exigences réduisent l'espace-solution pour l'optimisation de l'encombrement visuel de l'écran primaire de vol, car elles définissent l'information nécessaire à la tâche que doit présenter l'écran. Cette section liste les documents pertinents pour la conception de l'écran primaire de vol, puis présente les exigences en matière d'encombrement visuel.

1.3.1 Écran primaire de vol

Le Tableau 1.1 liste les documents pertinents pour la conception des informations de vol du PFD. Ces documents définissent autant les fonctions qui doivent être présentes à l'écran que la taille des caractères à utiliser⁵.

⁵ Le lecteur intéressé est invité à consulter les documents pertinents pour recenser les règles de conception.

Tableau 1.1 Documents de référence pour la conception de l'écran primaire de vol.

<i>Titre (numéro)</i>	<i>Description</i>
<i>Advisory circular on electronic flightdeck displays (AC 25-11A)</i>	Offre des consignes de conception pour démontrer la conformité de certaines exigences du code fédéral de régulation, chapitre 25, pour la conception, l'installation, l'intégration et l'approbation des affichages numériques du poste de pilotage.
<i>Aerospace recommended practice on electronic displays (ARP4102-7)</i>	Recommande des symboles et des implémentations alternatives pour les affichages numériques du poste de pilotage.
<i>Military interface standard, aircraft display symbology, (MIL-STD1787B).</i> Document déclassifié.	Définit la symbologie employée sur les affichages d'avions militaires et l'information nécessaire à l'écran primaire de vol. Ne décrit pas la symbologie militaire classifiée.
<i>Aerospace recommended practice on human factor considerations in the design of multifunction display systems for civil aircraft (ARP5364)</i>	Établit les recommandations opérationnelles pour les considérations de facteurs humains dans la conception d'écrans multifonctions de l'avion. Ce document présente plusieurs informations et enseignements tirés des constructeurs d'avions.
<i>Numeral, letter and symbol dimensions for aircraft instrument displays (SAE-AIR1093)</i>	Recommande les dimensions minimales des caractères et symboles utilisées dans les affichages et le panneau d'instruments de l'avion.

Les recommandations et exigences énoncées dans ces documents de référence seront prises en compte au moment de concevoir l'écran primaire de vol pour notre expérience sur l'effet de l'encombrement visuel.

La minimisation de l'encombrement à l'écran est une exigence qui revient fréquemment dans les documents consultés. La prochaine section dresse les exigences des autorités réglementaires sur l'encombrement visuel des affichages de vol.

1.3.2 Exigences relatives à l'encombrement visuel

La revue des documents de référence pour la conception de l'écran primaire de vol pour les exigences relatives à l'encombrement visuel a permis d'identifier qu'ils demandent de formater

l'écran de façon à ce que l'encombrement visuel soit minimal. Pour ce faire, les documents formulent deux exigences: premièrement, réduire le nombre de symboles, de traits et de couleurs affichés à l'écran. Deuxièmement, offrir une fonction au pilote pour désencombrer l'écran (*de-clutter*) afin que celui-ci ne présente que l'information suffisante pour la phase de vol en cours.

La FAA, dans sa circulaire AC-25-11A sur les affichages électroniques du poste de pilotage, affirme qu'un « *écran encombré présente un nombre excessif ou une variété de symboles, de couleurs, ou d'autres informations inutiles*⁶ » (FAA, 2007, p. 49). Le document identifie trois effets négatifs de l'encombrement d'un écran, soit l'interférence avec la tâche de vol en cours, l'augmentation du temps de traitement pour interpréter l'information et la distraction à l'égard de l'information nécessaire pour piloter l'avion. Pour ces raisons, le document conclut que « *l'information devrait être affichée pour que l'encombrement soit minimisé.* »

La circulaire recommande d'implanter une fonction pour désencombrer l'écran. Le pilote peut l'activer afin de retirer l'information jugée superflue pour une phase de vol. Cette fonction devrait être activée automatiquement dans le cas où l'avion atteint des conditions d'opération inhabituelles. On considère que retirer l'information superflue devrait aider le pilote à ramener l'avion dans son enveloppe d'opération normale.

Minimiser l'encombrement à l'écran est aussi une exigence pour les avions militaires. Le standard MIL-STD-1787B (Military Interface Standard, 1996) a été rédigé par le département de la défense américain. Il définit la symbologie standard à utiliser pour l'affichage d'un avion à usage militaire et l'information pertinente à afficher. Bien que le document concerne les affichages militaires, les concepteurs d'interfaces du domaine civil s'y réfèrent aussi, car le document offre des consignes de conception quantifiées. La première exigence du document demande que l'information soit présentée de façon à réduire la perception d'encombrement de l'écran.

« Displays shall present information needed for all instrument flight maneuvers to include takeoff, navigation, and landing. Symbols and symbol formats shall be integrated with emphasis on enhancing the pilot's spatial orientation and situational awareness while

⁶ « *A cluttered display presents an excessive number or variety of symbols, colors, and/or other unnecessary information and, depending on the situation, may interfere with the flight task or operation.* »

minimizing display clutter, particularly when visibility is poor. » (Military Interface Standard, 1996, p. 7) (Emphase ajoutée.)

Ce document recommande aussi de fournir au pilote une fonction pour désencombrer l'écran afin de ne présenter que l'information nécessaire pour assurer le pilotage sécuritaire de l'avion. Le document précise d'ailleurs une liste d'éléments, jugés secondaires, à retirer de l'écran en fonction de la phase de vol – décollage, croisière, pilotage automatique, approche (Military Interface Standard, 1996). Ce dernier point suggère que l'encombrement d'un écran doit être évalué en fonction du contexte d'opération et de la tâche à compléter – dans ce cas en fonction de la phase de vol et de ses tâches associées.

Bombardier Aéronautique fait aussi référence à la réduction de l'encombrement des écrans dans son guide de styles détaillant la philosophie et les règles de conception du poste de pilotage de ses avions. Le chapitre détaillant les spécifications des affichages écrans stipule que pour « *réduire l'effet de l'encombrement [...] la densité d'information devrait être limitée à 60%* » (Bombardier Aéronautique, 2011, p. 34). Ce dernier point se traduit donc en une exigence pour la présentation de l'information à l'écran. Le document précise aussi des techniques de réduction de l'encombrement, soit limiter le nombre de groupes d'information et le nombre de couleurs, limiter le nombre d'alignements, regrouper l'information appropriée, ajouter de l'espace vide (*blank space*, en anglais) entre les groupes et utiliser une taille appropriée pour afficher les éléments.

Le standard MIL-STD-1472F détaillant les critères de design ergonomique du département de la défense américain stipule deux exigences pour l'information affichée à l'écran. Premièrement que la « *densité d'information devrait être minimisée pour des écrans utilisés pour une tâche critique* », et deuxièmement que « *lorsqu'un écran contient trop de données sur une seule vue, les données devraient être partitionnées sur plusieurs pages* » (Military Interface Standard, 1999, p. 179). Ces deux exigences font ressortir le besoin de conserver une limite supérieure à la quantité d'information affichée à l'écran.

Trois points ressortent de l'analyse des exigences des autorités réglementaires en aviation. Premièrement, que l'encombrement d'un écran provient de l'abondance d'information affichée et de l'information jugée comme non-pertinente pour la tâche en cours. Deuxièmement, que l'encombrement de l'écran doit être minimisé. Troisièmement, que les exigences ne proposent

pas de mesures ou de métriques pour vérifier le niveau d'encombrement de l'écran. Certains documents utilisent la notion de densité d'information à l'écran pour évaluer l'encombrement, mais comme le montrera le Chapitre 2, cette mesure ne capture qu'une seule des trois dimensions contribuant à l'encombrement. On comprend dès lors le besoin exprimé par le milieu de pratique pour l'établissement de lignes directrices et de méthodes d'évaluation de l'encombrement afin qu'il puisse démontrer qu'il respecte les exigences des autorités réglementaires.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'ENCOMBREMENT VISUEL DES ÉCRANS

Le chapitre précédent a présenté les affichages et les instruments de vol du poste de pilotage, en plus d'énoncer les grandes lignes de la problématique de l'encombrement visuel des affichages dans le contexte de l'aéronautique. Le chapitre actuel présente une revue de la littérature scientifique sur l'encombrement visuel des écrans. Cette revue porte sur les domaines de l'interaction humain-ordinateur, de l'aérospatial et de la vision humaine.

Premièrement, le chapitre présente une revue des définitions de l'encombrement visuel. Nous montrerons qu'il existe plusieurs définitions de l'encombrement visuel, mais que la plupart d'entre elles ont pour point commun d'identifier deux dimensions à l'encombrement, soit l'abondance de symboles à l'écran et la présence d'information jugée comme inutile pour la tâche. Nous proposons une nouvelle définition qui ajoute une troisième dimension, soit le contexte dans lequel la tâche est réalisée. Deuxièmement, nous présentons les éléments qui contribuent à augmenter l'encombrement visuel d'un affichage pour chacune de ces trois dimensions. Troisièmement, nous comparons les métriques pour mesurer le niveau d'encombrement d'un affichage. Quatrièmement, nous montrons que l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de l'utilisateur dépend de la tâche réalisée en passant en revue les études passées pour deux tâches : la prospection visuelle et le pilotage d'avion. Cinquièmement, nous montrons que les études passées sur la tâche de pilotage d'avion n'ont pas contrôlé la variable d'encombrement visuel de l'affichage de manière similaire. Pour ce faire, nous proposons trois exigences que tous les affichages utilisés pour une expérience sur l'encombrement visuel devraient respecter.

2.1 Revue des définitions de l'encombrement visuel

Il existe plusieurs définitions de l'encombrement visuel d'un affichage. La caractéristique de l'encombrement visuel mise en évidence par chaque définition varie selon le sujet de l'étude; certains auteurs mettent de l'avant la quantité de symboles affichés alors que d'autres mettent

l'accent sur la présence d'information inutile⁷ pour la tâche. Il y a aussi une opposition entre les groupes de définitions pour définir l'encombrement visuel comme une *propriété* de l'écran, c'est-à-dire en fonction des éléments affichés à l'écran, ou comme une *relation* entre la tâche de l'utilisateur et l'écran.

Dans cette section, nous passons en revue les définitions existantes dans la littérature de l'encombrement visuel. Nous avons regroupé les différentes définitions en quatre catégories, afin de comparer leurs caractéristiques. Chaque catégorie est présentée et comparée. À l'issue de la section, nous proposons une nouvelle définition qui met en évidence la dépendance de l'encombrement visuel au contexte de la tâche, une caractéristique absente des définitions existantes.

2.1.1 Nombre d'éléments

Une majorité d'études ont défini l'encombrement visuel en fonction du nombre de symboles et d'éléments affichés à l'écran, que ce soit dans le domaine de la psychologie perceptuelle (Baldassi, Megna, & Burr, 2006; Bravo & Farid, 2004, 2006, 2008; Wolfe, 2007), de l'étude de l'affichage de cartes de navigation (Lohrenz, Trafton, Beck, & Gendron, 2009; Phillips & Noyes, 1982; Wickens, Alexander, Ambinder, & Martens, 2004), ou des affichages d'aviation (McCrobie, 2000; Wickens, 2003).

Ce groupe de définitions tire ses origines des expériences de psychologie de la perception et de prospection visuelle où le temps de recherche d'une cible est proportionnelle au nombre de symboles à l'écran (Eckstein, 2011; Treisman & Gelade, 1980). Le nombre de symboles à l'écran diminue l'efficacité de la recherche car l'observateur doit y allouer son attention de manière sérielle (Wolfe, 2007). Par exemple, Baldassi et ses collègues (2006) utilisent le nombre de symboles affichés (*set size*, en anglais) comme l'indication du niveau d'encombrement de l'affichage. Bravo et Farid proposent que l'encombrement soit le nombre de parties visibles d'un objet sur la scène (Bravo & Farid, 2004, 2006, 2008).

De manière similaire, Phillips et Noyes (1982) défendent l'idée que l'encombrement visuel d'une carte dépend de son nombre de symboles, de lignes et de marques. Dans une série d'études

⁷ Pour simplifier, ce document utilise information au singulier (usage emprunté de l'anglais).

évaluant la facilité de recherche sur une carte de terrain, Wickens et ses collègues ont varié l'encombrement de la carte en ajoutant des symboles à l'écran (rivière, lac, montagne, etc.) sans toutefois offrir une définition formelle de l'encombrement dans leurs articles (Kroft & Wickens, 2002; Wickens, Alexander, Ambinder, et al., 2004). Toutefois, Wickens (2003) offre une définition formelle de l'encombrement visuel comme le nombre de marques ou de régions visuellement contrastées présentées à l'écran. En accord avec les définitions précédentes, on en déduit que le nombre de symboles et la densité d'information à l'écran sont les propriétés distinctives de l'encombrement visuel.

La littérature des IHM n'emploie pas fréquemment le terme d'encombrement visuel. Les auteurs décrivent plutôt un écran en termes de densité d'information (Danchak, 1985; Tullis, 1981, 1997) d'espace vide (Watzman, 2003; Weller, 2004) et de nombre de groupes à l'écran (Mayhew, 1992; Parush, Shwartz, Shtub, & Chandra, 2005; Tullis, 1981). Ces termes sont équivalents puisqu'un écran encombré affiche une densité d'information élevée, peu d'espace vide et plusieurs groupes d'information.

Les définitions précédentes présentent l'encombrement comme une *propriété* de l'écran, ce qui signifie que l'encombrement dépend uniquement des éléments affichés à l'écran. Ces définitions font abstraction de la nature de la tâche réalisée par l'utilisateur ou du niveau d'expertise de ce dernier. Définir l'encombrement visuel comme la densité de symboles à l'écran ne reflète pas non plus l'organisation et le regroupement de l'information, ni la pertinence de l'information affichée pour la tâche de l'opérateur. Un affichage dense mais avec une organisation de l'information adéquate pour la tâche peut s'avérer bénéfique pour l'opérateur (Mayhew, 1992; Tullis, 1988)

2.1.2 Interférence avec la vue extérieure

Un second groupe d'auteurs intéressés à l'étude des affichages tête haute (*Head up display* HUD, en anglais) définissent l'encombrement visuel comme l'interférence ou le masquage des symboles du HUD avec la vue extérieure (Horrey & Wickens, 2004; Yeh, Merlo, Wickens, & Brandenburg, 2003; Yeh, Wickens, & Seagull, 1999). Dans ce cas, le HUD *encombre* le champ de vision⁸ en se superposant au champ de vision extérieure alors que l'affichage tête basse (*Head*

⁸ Notez l'usage du verbe dans la définition.

down display HDD, en anglais) n'est pas encombré, peu importe la symbologie affichée. Yeh et ses collègues étudient l'avantage de l'affichage tête haute comme un compromis entre, d'une part, la réduction du parcours visuel de l'écran à la vue extérieure et, d'autre part, l'accroissement de l'encombrement visuel dû à l'interférence des symboles (Yeh et al., 2003, 1999). Horrey et Wickens (2004) défendent une définition semblable de l'encombrement. L'affichage avec un encombrement élevé est celui qui superpose l'information sur le champ de vision avant de l'opérateur alors que l'affichage tête basse, présentant la même information, est décrit comme non-encombré (*uncluttered*, en anglais).

L'interférence des symboles de l'affichage tête haute avec la vue extérieure est une préoccupation dans le domaine aérospatial et fait l'objet de recommandations par un comité d'experts (SAE International, 1998). Toutefois, l'objet d'application de cette famille de définitions –l'étude de l'affichage tête haute– n'est pas pertinent dans le cadre de cette thèse.

2.1.3 Définition opérationnelle

Un troisième groupe de définitions emploie une définition opérationnelle de l'encombrement, c'est-à-dire une définition du phénomène selon ses conséquences observables. Rosenholtz et ses collègues, dans leur article considéré comme le plus influent sur l'étude de l'encombrement visuel (van den Berg, Cornelissen, & Roerdink, 2009), proposent une définition en fonction de la diminution de performance dans une tâche de prospection visuelle : « *L'excès d'items, ou leur représentation ou organisation conduit à une dégradation de la performance à certaines tâches* »⁹ (Rosenholtz, Li, & Nakano, 2007, p. 3). Pareillement, Regal et Knapp définissent l'encombrement comme une surabondance d'informations détériorant la capacité de l'utilisateur à analyser l'information pertinente (Regal & Knapp, 1984).

Lloyd (2006), dans son mémoire de maîtrise sur les métriques d'encombrement visuel pour les affichages aériens, formule aussi une définition de l'encombrement en fonction de ses effets, soit un état de confusion qui dégrade la précision et la facilité d'interprétation de l'information

⁹ «*Excess items, or their representation or organization, lead to a degradation of performance at some task.*»

affichée¹⁰. Cette dernière définition, contrairement à celles de (Regal & Knapp, 1984; Rosenholtz et al., 2007), ne fait pas mention au nombre de symboles à l'écran ou à la surabondance d'information.

La limitation d'une définition opérationnelle de l'encombrement est de *postuler* une diminution de la performance de l'opérateur avec une hausse du niveau d'encombrement de l'affichage. Or, comme nous le présenterons à la section 2.4, l'effet de l'encombrement sur la performance dépend de la tâche réalisée. Il est donc avisé de décrire le phénomène par d'autres artéfacts, comme les propriétés de l'affichage ou la présence d'information superflue pour la tâche de l'opérateur plutôt que par son effet sur la performance.

2.1.4 Information inappropriée

Alors que la définition de l'encombrement visuel comme l'abondance de symboles à l'écran fait abstraction de la tâche supportée par l'affichage, un quatrième groupe de définitions précise qu'un écran est perçu comme encombré s'il présente des symboles ou de l'information inappropriée pour la tâche de l'opérateur. Lohrenz et ses collègues définissent l'encombrement de cartes géographiques comme une surabondance d'information pertinente (Barbu, Lohrenz, & Layne, 2006; Lohrenz & Hansman, 2004; Lohrenz et al., 2009). Ververs et Wickens (1996, 1998) n'offrent pas une définition formelle de l'encombrement, mais font varier l'encombrement du PFD en ajoutant de l'information de vol redondante en périphérie de l'écran. L'information est dite redondante car elle est répète une valeur déjà affichée, par exemple afficher la vitesse à deux endroits à l'écran. Bolton et Braun (1996) font de même en ajoutant des libellés redondants sur la position de l'appareil et sa vitesse.

Cette famille de définitions fait ressortir une nouvelle caractéristique de l'encombrement visuel : afficher une fonction ou un libellé d'information qui n'est pas utile pour la tâche courante de l'opérateur contribue à encombrer l'affichage. L'encombrement visuel est ici présenté comme l'inadéquation entre les buts courants de l'opérateur et ce qui se trouve à l'écran.

¹⁰ « *Clutter is a state of confusion that degrades both the accuracy and ease of interpretation of information displays.* » (p. 14)

En effet, il est compréhensible qu'un concepteur d'interfaces –ou de cartes géographiques dans ce cas– désire présenter à l'utilisateur toute l'information à laquelle son application a accès. Comme nous l'avons expliqué au Chapitre 1, une situation semblable s'est produite en aviation lors de la transition des instruments de vol mécaniques aux affichages numériques dans le poste de pilotage. Le concepteur peut afficher de l'information provenant de plusieurs sources sur un seul écran. Or c'est cette surabondance d'information, pertinente ou non pour la tâche courante, qui contribue à l'encombrement de l'affichage. La définition retenue dans cette thèse doit reconnaître la contribution de la pertinence de l'information à l'encombrement visuel.

2.1.5 Pertinence au domaine de l'aviation

Les définitions de l'encombrement visuel retenues par les organismes de réglementation aériennes reflètent les deux principaux facteurs identifiés dans la revue de littérature. La circulaire AC 25-11A de la FAA sur les affichages électroniques du poste de pilotage définit l'encombrement visuel à l'écran comme (1) un nombre excessif de symboles ou de couleurs, ou comme (2) la présence d'information inutile pouvant nuire à la tâche de vol (FAA, 2007, p. 49)¹¹.

Pareillement, le comité SAE International sur les problématiques de facteurs humains en aviation (SAE International, 1998) a formulé cinq concepts pour décrire l'encombrement visuel d'un affichage tête haute, soit:

1. l'interférence de symboles
2. l'occlusion des éléments extérieurs (ex., trafic)
3. une symbologie inappropriée pour la phase de vol
4. une symbologie excessive pour la phase de vol
5. la priorité d'affichage des symboles.

On constate que le groupe de facteurs proposé par SAE International pour décrire l'encombrement visuel recoupe l'ensemble des définitions précédentes. Cela suggère que

¹¹ « *A cluttered display presents an excessive number or variety of symbols, colors, and/or other unnecessary information and, depending on the situation, may interfere with the flight task or operation.* »

l'encombrement visuel des affichages d'avions est un objet à plusieurs dimensions et qu'il faille tenir compte de ces différents facteurs afin de comprendre la nature du problème.

Les pilotes d'avions perçoivent l'encombrement visuel comme un phénomène multidimensionnel (Alexander, Stelzer, Kim, & Kaber, 2008; Kaber et al., 2008). Alexander et ses collègues ont interrogé quatre pilotes experts sur les facteurs contribuant à l'encombrement d'un affichage tête haute (Alexander et al., 2008). Ils ont trouvé que les propriétés de l'écran (densité visuelle, nombre de symboles, etc.) et la pertinence de l'information pour la tâche contribuent à la perception d'encombrement d'un écran. Les auteurs ont décrit la première dimension comme la densité visuelle et la seconde comme la densité d'information. Bien que l'ajout de symboles à l'écran offre une information de vol accrue, les pilotes considèrent que l'écran est encombré lorsque la densité visuelle excède la densité d'information requise pour la tâche.

Kaber et ses collègues (2008) ont validé ce modèle à deux dimensions de l'encombrement (densité visuelle vs. densité d'information) en identifiant cinq paires de descripteurs expliquant le mieux la perception d'encombrement : redondant/orthogonal, monochromatique/coloré, non saillant/saillant, non sécuritaire/sécuritaire et épars/dense. Notez que ces couples de descripteurs proviennent tant de la densité visuelle (coloré, saillant, dense) que de la densité d'information (redondant, sécuritaire).

2.1.6 Dépendance au contexte

La revue des définitions a permis de montrer que l'encombrement est défini selon plusieurs dimensions, les deux principales étant la densité visuelle, soit le nombre de symboles à l'écran, et la densité d'information, soit la présence d'information non pertinente pour la tâche. Le contraste entre ces deux dimensions fait ressortir l'opposition pour la définition d'un phénomène par une approche ascendante (*bottom-up approach*), soit selon les propriétés de l'affichage comme le nombre de traits et de symboles, et suivre une approche descendante (*top-down approach*), soit en fonction des connaissances de l'opérateur sur l'organisation de l'information à l'écran. Cette revue de littérature a permis de montrer que les deux facteurs (densité visuelle et densité d'information) contribuent à la perception d'encombrement de l'écran et doivent donc être présents dans la définition du phénomène.

Dans un effort pour rejoindre les deux visions contrastées de la surcharge d'information (*information overload*) comme tirant sa source soit des propriétés de l'écran ou de la pertinence de l'information pour l'opérateur, Woods et ses collègues ont mis de l'avant le rôle clé que joue la *relation entre l'affichage et son utilisateur* (Woods, Patterson, & Roth, 2002). Ce qui donne la pertinence à un élément d'information à l'écran, expliquent Woods et ses collègues, dépend du contexte de la tâche, de l'affichage et des attentes, intentions et intérêts de l'utilisateur.

Illustrons ce propos avec le système d'alarmes de l'équipage (*Crew alerting system, CAS*) présent à bord de l'avion (voir Figure 2.1). Si un message d'alarme apparaît en vol indiquant une faille des pompes hydrauliques, cela peut signifier que les pompes sont effectivement inopérantes; qu'il y a un problème avec le détecteur des pompes si le même message apparaît à nouveau malgré que l'on ait suivi la bonne procédure de résolution du problème; ou une situation plus dangereuse si le même message apparaît simultanément avec d'autres messages d'alarmes. Le message d'alarme a une signification radicalement différente en fonction du contexte dans lequel il apparaît.

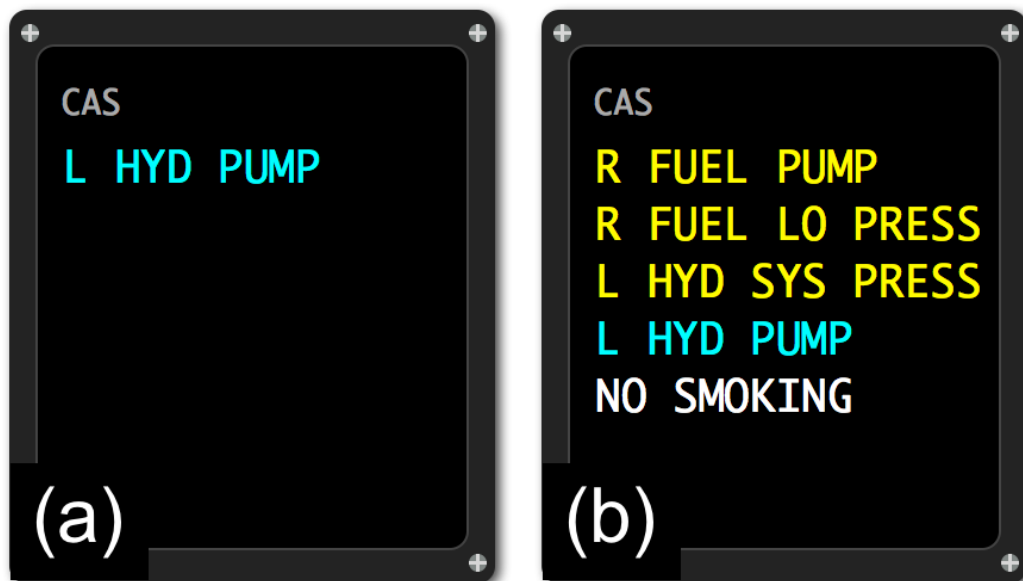


Figure 2.1 Le même message prend une signification radicalement différente s'il (a) apparaît seul ou (b) simultanément avec d'autres messages d'alarmes.

En ce sens, l'encombrement visuel n'est pas seulement une propriété de l'écran, mais plutôt le résultat d'une conception qui empêche l'utilisateur de concentrer son attention sur les groupes d'informations pertinents en fonction du contexte particulier (Woods et al., 2002). Toujours selon

Woods et ses collègues, diminuer l'encombrement en réduisant le nombre de symboles à l'écran ou en présentant moins d'information à l'utilisateur fait fi de la dépendance au contexte. La théorie de la Gestalt nous apprend que plus de symboles à l'écran, si ceux-ci sont bien intégrés et présentent une forme unie plutôt qu'un agrégat de traits, permet de diminuer la perception d'encombrement (Wertheimer, 1938). Cet aspect est absent des théories limitant le champ d'étude de l'encombrement à celui de la densité visuelle.

La dépendance au contexte est absente des définitions précédentes de l'encombrement mettant l'importance sur le nombre de symboles à l'écran. Clairement, elle doit être mentionnée dans la définition de l'encombrement.

2.1.7 Synthèse

Cette revue de littérature a permis de montrer qu'il existe plusieurs définitions de l'encombrement visuel d'un affichage. La densité visuelle et la densité d'information sont les deux principaux contributeurs de l'encombrement identifiés par les études précédentes (Alexander et al., 2008; Kaber et al., 2008). Nous avons aussi montré que la dépendance au contexte est absente des définitions existantes.

Il est pertinent de faire un choix stratégique dans la définition pour retenir les éléments pertinents à notre sujet d'étude. Comme le soulignent avec justesse Kim et ses collègues, à défaut d'avoir une définition suffisamment restreignante, tous les symboles qui ne sont pas satisfaisants à l'œil du pilote pourront être décrits comme ajoutant à l'encombrement (Kim et al., 2011). Cette thèse étudie l'encombrement visuel d'un affichage PFD tête basse. À ce titre, la définition de la circulaire AC 25-11A, présentée à la section 2.1.5, est la plus pertinente à ce travail. Toutefois, la définition gagnerait à faire référence à l'organisation de l'écran et au contexte de la tâche.

Deux autres observations sont de mise avant d'énoncer une nouvelle définition. Premièrement, le mot « encombrement » a une connotation négative dans le langage courant. Il en est de même avec son équivalent anglais *clutter*. D'un point de vue scientifique, il serait préférable d'utiliser un mot neutre pour décrire une interface. On pourrait lui privilégier les termes densité visuelle, densité d'information, poids visuel ou charge visuelle. Toutefois, le terme anglais *visual clutter* est désormais largement utilisé dans la communauté des facteurs humains et particulièrement en aérospace; la circulaire AC 25-11A et le standard militaire MIL-STD 1787B l'utilisent tous

deux. C'est pourquoi nous utiliserons aussi le mot encombrement, non sans avoir énoncé cette précaution.

Deuxièmement, nous privilégions étudier l'encombrement comme une *propriété* de l'affichage et comme la *relation* entre l'utilisateur et l'affichage. Cela permet de décrire l'état d'encombrement d'un affichage, par exemple en quantifiant la densité de symboles ou la variété de couleurs à l'écran, sans faire abstraction du fait que l'affichage est conçu pour réaliser une ou plusieurs tâches par son utilisateur. Cette perspective se veut un compromis entre les visions de l'encombrement basées exclusivement sur le format de l'écran et celles basées sur les connaissances de l'utilisateur.

Nous proposons donc la définition suivante pour l'encombrement visuel :

L'encombrement visuel est l'état d'un affichage présentant au moins l'une des trois conditions suivantes : (1) une abondance ou une variété de symboles ou de couleurs, (2) une information jugée comme non pertinente pour la tâche et le contexte, (3) un manque d'organisation et de structure. L'évaluation de l'encombrement visuel doit tenir compte du contexte d'utilisation et de la tâche de l'opérateur.

2.2 Contributeurs à l'encombrement

Les études précédentes ont identifié plusieurs éléments graphiques contribuant à augmenter la perception d'encombrement de l'affichage. Le modèle à trois dimensions de l'encombrement que nous proposons (densité visuelle, densité d'information, et organisation) offre un cadre conceptuel pour étudier ces éléments contributeurs. Cette section présente les principaux éléments graphiques identifiés par les études passées comme augmentant ou diminuant l'encombrement visuel. Suite à cette revue, un concepteur d'interface peut modifier les éléments graphiques identifiés afin de diminuer la perception d'encombrement de son application.

Les résultats sont présentés pour chacune des trois dimensions de l'encombrement. Les contributeurs identifiés pour la dimension de densité visuelle sont les attributs visuels et la qualité esthétique de l'interface. Le contributeur identifié pour la dimension de densité d'information est la pertinence à la tâche. Le contributeur identifié pour la dimension d'organisation est le regroupement.

2.2.1 Densité visuelle

Nous avons identifié deux catégories de contributeurs à l'encombrement visuel pour la densité visuelle : les attributs visuels et la qualité esthétique de l'interface.

2.2.1.1 Attributs visuels

Les attributs visuels (*visual features*, en anglais) sont les propriétés observables et quantifiables de l'interface comme la couleur, le contraste à l'écran ou la police de caractère. Cette catégorie est celle contenant le plus d'éléments et le plus d'études pour les supporter dans la revue de littérature. L'étude des attributs visuels de l'écran a l'avantage de traiter de propriétés objectives, quantifiables et manipulables, ce qui explique la popularité du sujet dans la littérature.

Le Tableau 2.1 présente les attributs visuels contributeurs de l'encombrement. On remarque que les principales conclusions des études présentées sont en accord avec les consignes de conception d'interfaces, soit de faire preuve d'économie dans le choix des couleurs et des symboles à l'écran (Mayhew, 1992; Smith & Mosier, 1986), et de distinguer l'information prioritaire par sa taille ou sa luminosité (Tullis, 1997).

Tableau 2.1 Attributs visuels contributeurs de l'encombrement

<i>Attributs</i>	<i>Étude</i>	<i>A trouvé que</i>
<i>Couleur</i>	(Lohrenz et al., 2009; Rosenholtz et al., 2007)	Le nombre et la variété de couleurs du stimulus augmentent l'encombrement.
	(Shive & Francis, 2012)	Une distinction en couleur d'un symbole prioritaire réduit le temps d'identification sur un affichage encombré.
<i>Nombre de symboles</i>	(Alexander et al., 2008)	La perception d'encombrement est proportionnelle au nombre de fonctions affichées.
<i>Densité des symboles</i>	(Tullis, 1984, 1988) (Weller, 2004)	Un écran avec une densité de symboles élevée ralentit la recherche d'information.
	(Muthard & Wickens, 2005)	La diminution de la performance de détection en fonction de l'encombrement est plus importante pour un écran de petite taille.
<i>Alignement</i>	(Noble & Constantine, 1996; Parush, Nadir, & Shtub, 1998)	Uniformiser l'alignement des objets sur une grille réduit la complexité visuelle.
<i>Police de caractère</i>	(Reimer, Mehler, & Coughlin, 2012)	Une police de caractère avec empattement diminue la performance d'utilisation d'un système de navigation automobile.
<i>Luminance et contraste</i>	(Ververs & Wickens, 1998)	La luminosité de l'information secondaire est diminuée pour réduire la perception d'encombrement.
<i>Taille</i>	(Ewing, Woodruff, & Vickers, 2006)	Les symboles de même taille que la cible d'intérêt contribuent à l'encombrement.
<i>Similitude des symboles</i>	(Zuschlag, 2004)	La similitude des attributs visuels entre la cible d'intérêt et son entourage diminue sa visibilité.
<i>Texture</i>	(Aviram & Rotman, 2000; Rotman, Tidhar, & Kowalczyk, 1994)	Une abondance de textures différentes pour distinguer les objets contribue à l'encombrement.

L'abondance de couleurs du stimulus contribue à la perception d'encombrement chez les observateurs (Lohrenz et al., 2009; Rosenholtz et al., 2007). La vision fovéale humaine, impliquée dans les tâches nécessitant une haute acuité visuelle comme la lecture, est

particulièrement sensible à la couleur. Des résultats récents indiquent que la couleur est une modalité d'encodage plus distinctive que la taille ou l'orientation des symboles (van den Berg, Cornelissen, & Roerdink, 2008). La couleur devrait donc être utilisée judicieusement dans la conception d'interfaces afin d'attirer l'attention vers les groupes d'information pertinents sans encombrer l'affichage. Shive et Francis (2012) ont développé un modèle prédictif du temps de recherche d'un symbole sur une carte en fonction de sa couleur et de son excentricité du centre de la carte. Ils ont obtenu un gain de 10% dans le temps d'identification des cibles prioritaires ayant leur couleur optimisée comparativement à la carte originale. Toutefois, la distinction par la couleur demeure efficace pour un nombre limité de couleurs. Mayhew (1992) recommande de limiter le codage couleur à huit couleurs différentes afin de ne pas surcharger l'affichage.

Le nombre d'objets à l'écran est une propriété distinctive de l'encombrement. Alexander et collègues ont montré que la perception d'encombrement visuel du HUD par des pilotes est proportionnelle aux nombres de fonctions affichées (Alexander et al., 2008). Réduire le nombre de symboles à l'écran afin de ne conserver que l'information essentielle pour la tâche est un premier pas pour réduire la perception d'encombrement.

Tandis que le nombre de symboles considère la *quantité* d'objets, la densité considère leur *distribution* à l'écran. La densité des symboles indique combien l'information est densément distribuée. La densité globale mesure la densité moyenne de l'information pour tout l'écran, alors que la densité locale mesure la densité à proximité d'un objet d'intérêt, par exemple le libellé d'un menu. Durant son doctorat, Tullis (1984) a conçu 520 affichages variant selon six dimensions : densité globale, densité locale, nombre de groupes, taille des groupes, nombre d'alignements et nombre d'éléments¹² (voir le chapitre de (Tullis, 1988) pour un résumé de ses travaux). Il a mesuré le temps de diagnostic d'une panne d'un système électrique par huit techniciens et leur appréciation subjective de l'affichage. Les meilleurs prédicteurs du temps de diagnostic sont la densité globale, la densité locale, le nombre de groupes et leur taille, expliquant 49% de la variance. Les meilleurs temps de diagnostic sont obtenus avec un affichage ayant une faible densité. Les deux prédicteurs les plus significatifs de la perception subjective de l'affichage

¹² L'outil d'évaluation automatique de la qualité d'une interface développé par (Tullis, 1984) est présentée plus en détails dans la section des métriques d'encombrement.

sont l'alignement et la densité locale, les affichages recevant la meilleure perception ont un nombre d'alignement et une densité locale réduite. Bien sûr, la densité globale de l'écran n'est qu'un facteur. Tullis (1984) a montré que pour la même densité d'information, la performance d'un écran a été améliorée de 50% en regroupant les éléments et en présentant un meilleur formatage de l'interface.

Weller (2004) a obtenu des résultats similaires avec une page web, où la meilleure performance de recherche d'information a été obtenue pour l'affichage ayant une densité globale faible ($p < .01$). 90% des participants ont jugé la page ayant une densité globale élevée comme étant celle qu'ils ont le moins appréciée. Weller n'a observé aucun effet significatif pour la densité locale.

Muthard et Wickens (2005) ont manipulé la taille physique d'un écran de trafic aérien et son niveau d'encombrement en augmentant le nombre d'avions à proximité. Les pilotes devaient détecter une collision possible entre leur appareil et ceux à proximité. Les auteurs ont trouvé une interaction significative entre la taille de l'écran et le niveau d'encombrement ($p < .001$) indiquant que lorsque le niveau d'encombrement augmente, la performance de surveillance diminue de 30% uniquement pour l'écran le plus petit. Ces résultats montrent qu'une densité visuelle élevée avec un écran de petite taille et une densité de symboles importante diminue la performance de détection d'événements.

Uniformiser la disposition des objets à l'écran en minimisant le nombre d'alignements verticaux offre une interface visuellement plus agréable et plus facile d'utilisation. Parush et ses collègues ont amélioré de 20% le temps de recherche pour trouver un champ interactif pour les interfaces minimisant le nombre d'alignements comparativement aux interfaces sans grille pour l'alignement (Parush et al., 1998). Les participants jugent plus favorablement l'interface minimisant le nombre d'alignements. Pour Noble et Constantine (1996) la qualité visuelle d'une interface est inversement proportionnelle à son nombre d'alignements uniques.

La police de caractère employée influence aussi l'encombrement visuel de l'application. Reimer et ses collègues ont comparé l'utilisabilité d'un appareil de navigation automobile en employant une police sans empattement, dite humaniste, versus une police avec empattement, dite

grotesque¹³ (Reimer et al., 2012). Ils ont trouvé que l'interaction de l'utilisateur avec la police humaniste réduit de 10.6% le temps d'observation de l'écran, et donc hors de la route, et réduit de 3.1% le nombre d'erreurs de sélection. Employer une police de caractère sans empattement (*sans serif*) est une méthode permettant d'améliorer la qualité de l'affichage et réduire la charge visuelle consacrée à l'interface (Brighurst, 2002; Watzman, 2003).

La mise en évidence de l'information primaire de vol en augmentant son contraste par rapport à l'information secondaire permet de réduire la charge visuelle de l'écran (Ververs & Wickens, 1998). De même, un contraste élevé entre l'information interactive et l'arrière-plan facilite la lecture et le repérage de l'information (Ling & van Schaik, 2002). Le standard MIL 1472-F recommande un ratio de luminosité d'au moins 3:1 entre le symbole et l'arrière-plan pour faciliter la lecture.

Ewing et collègues ont montré que les objets affichés de même taille que l'objet d'intérêt contribuent à l'encombrement visuel (Ewing et al., 2006). La distinction des objets par différentes tailles facilite le regroupement perceptuel des différents groupes d'information.

Comme pour la taille, la similitude des objets à l'écran réduit la visibilité du symbole d'intérêt primaire. Zuschlag (2004) a montré que pour un affichage HUD, l'utilisation à l'écran des mêmes attributs visuels que le symbole primaire du FPV réduit sa saillance et augmente la perception d'encombrement global de l'écran.

Finalement, l'utilisation de différentes textures pour distinguer les objets à l'écran augmente l'encombrement visuel de l'affichage (Aviram & Rotman, 2000; Rotman et al., 1994). La texture est définie comme un patron de couleurs répétitif sur une surface donnée (p. ex., lignes hachurées, fonds pointillés, etc.) Aviram et Rotman (2000) ont montré qu'utiliser une texture pour l'objet d'intérêt distinctive de l'arrière-plan facilite son identification, mais que l'abondance de textures à l'écran à différentes échelles spatiales accentue son encombrement visuel global.

¹³ Une police humaniste offre des lettres distinguables par leur forme, ouverture et espace. Exemple : Lucida Grande, Gill Sans, Myriad, Frutiger. Une police grotesque a des lettres similaires en forme et en largeur, les rendant moins distinguables. Exemple : Franklin Gothic, Eurostile. Voir (Brighurst, 2002) pour une étude détaillée de la typographie.

Globalement, ces résultats identifient une série de paramètres sous le contrôle du concepteur d'interface afin de réduire la perception d'encombrement : faire preuve d'économie dans l'utilisation de la couleur, employer une grille pour la disposition des objets à l'écran et préférer une police de caractères sans empattement. Nous pouvons aussi souligner que ces résultats sont conformes aux recommandations des consignes de conception, privilégiant la simplicité et le minimalisme dans la conception d'interfaces.

2.2.1.2 Qualité esthétique

La qualité esthétique d'une interface est une propriété subjective de la représentation visuelle harmonieuse de l'information à l'écran (Moshagen & Thielsch, 2010). L'étude de la qualité esthétique des interfaces a suscité de l'intérêt dans les dernières années dans le domaine de l'expérience utilisateur (Law & van Schaik, 2010; Robert, 2008) et des métriques de prédiction de l'utilisabilité d'une interface en fonction de sa qualité esthétique (Altaboli & Lin, 2011; Ngo, Teo, & Byrne, 2003; Wu, Chen, Li, & Hu, 2011; Yang & Klemmer, 2009).

Il peut sembler étonnant de parler de l'esthétique d'une interface dans le cadre d'un travail sur l'effet de l'encombrement visuel du PFD sur la tâche de vol. Pourtant, des résultats récents montrent que la qualité esthétique d'une interface a un effet sur la performance d'une tâche (Gannon, 2005, 2010; Hartmann, Sutcliffe, & Angeli, 2008; Lavie, Oron-Gilad, & Meyer, 2011). De plus, l'esthétique d'une interface dépend de sa conception graphique, tout comme l'encombrement visuel. Il est donc pertinent de l'étudier.

L'identification des facteurs influençant la perception de la qualité esthétique d'une interface par l'utilisateur fait toujours l'objet de recherche. Lavie et Tractinsky (2004) ont identifié deux catégories pour décrire l'esthétique d'une interface : esthétique classique et esthétique créative. L'esthétique classique est le respect des règles de simplicité, de symétrie et d'organisation de l'interface, alors que l'esthétique créative est la rupture de ces règles pour créer un effet de surprise et de nouveauté. Les auteurs ont développé le questionnaire d'Évaluation des qualités visuelles (*Visual qualities rating sheet*) pour évaluer ces deux catégories (Lavie & Tractinsky, 2004). Pour le développement du Répertoire de la qualité visuelle du site web (*Visual aesthetics of website inventory*, *VisAWI*) Moshagen et Thielsch (2010) ont identifié quatre catégories de facteurs d'esthétique, soit la simplicité, la diversité, l'imagerie (*colorfulness*) et l'artisanat

(*craftsmanship*). Les catégories de simplicité et diversité de (Moshagen & Thielsch, 2010) sont similaires à l'esthétique classique et créative de (Lavie & Tractinsky, 2004), respectivement.

Hartmann et ses collègues ont modifié la qualité esthétique de sites web, tout en conservant un contenu similaire entre les pages (Hartmann et al., 2008). Ils ont trouvé un effet d'halo où la page esthétiquement plus agréable est jugée comme préférable par les utilisateurs, malgré que les résultats objectifs montrent une diminution de la performance, mesurée par le nombre d'erreurs. D'autres études ont montré un effet d'halo en rapportant une corrélation positive entre la qualité esthétique de l'interface et son utilisabilité perçue par l'utilisateur (Tractinsky, Katz, & Ikar, 2000; Tractinsky, 1997), de même qu'avec la satisfaction de l'utilisateur du système (Lindgaard & Dudek, 2003). Toutefois, Hassenzahl (2004) remet en question ce lien en montrant une corrélation faible ou nulle entre la qualité esthétique perçue d'un lecteur MP3 et son utilisabilité.

L'étude de Lavie et ses collègues permet de faire le pont entre qualité esthétique, encombrement visuel et utilisabilité (Lavie et al., 2011). Les auteurs ont conçu différentes cartes géographiques en manipulant trois variables : quantité de données (encombrement), niveau d'abstraction et palette de couleurs. Vingt-deux participants ont répondu à des questions d'orientation spatiale utilisant ces cartes tout en réalisant une double tâche de poursuite, similaire à la conduite automobile. Les auteurs ont trouvé que la quantité de données (encombrement) affecte toutes les mesures de performance objectives et subjectives et la qualité esthétique perçue, mesurée par le questionnaire modifié de (Lavie & Tractinsky, 2004). Les cartes ayant le minimum d'information sont perçues comme plus esthétiques, ayant une meilleure utilisabilité et offrant un temps de réponse plus rapide et moins d'erreurs. Deux limitations de cette étude sont que les auteurs n'ont pas évalué l'effet de la réduction d'information sur la conscience de la situation des utilisateurs (Leshed, Velden, Rieger, Kot, & Sengers, 2008) et que la tâche de conduite était artificielle.

Dans sa thèse de doctorat, Gannon (2005) a manipulé la qualité esthétique de quatre PFD utilisés par 24 pilotes pour compléter une phase d'approche en simulateur de vol. Les pilotes ont évalué la qualité esthétique de chaque PFD à l'aide du questionnaire modifié de (Lavie & Tractinsky, 2004). Gannon a trouvé que les pilotes utilisant le PFD esthétiquement plus agréable ont une charge de travail inférieure ($p < 0.05$) telle que mesurée par le NASA-TLX. L'auteur n'a observé aucun effet sur le contrôle de l'avion (déviations du G/S et LOC non significatives), ni sur le temps de détection d'une alarme (apparition d'un message CAS). Ces résultats montrent

l'importance d'optimiser la représentation graphique de l'interface dans le domaine de l'aviation (Gannon, 2010).

Globalement, les résultats présentés dans cette section indiquent que la qualité esthétique d'une interface influe sur l'utilisabilité perçue (Hartmann et al., 2008) et la performance perçue par l'utilisateur (Gannon, 2005). Réduire l'encombrement visuel en éliminant les données inutiles pour la tâche offre un affichage esthétiquement plus agréable et améliore la performance de l'utilisateur (Lavie et al., 2011).

2.2.2 Densité d'information

La seconde catégorie de contributeurs à l'encombrement visuel est la densité d'information, causée par une abondance d'information utile ou redondante. Conséquemment, nous avons identifié un contributeur à l'encombrement pour cette catégorie, soit la pertinence de l'information pour la tâche. Nous discutons par la suite de l'utilité de techniques de filtrage pour réduire l'encombrement à l'écran et leurs effets sur la conscience de la situation.

2.2.2.1 Pertinence à la tâche

Le facteur de pertinence à la tâche fait référence à des éléments présentés à l'écran qui ne sont pas nécessaires pour la tâche actuelle de l'opérateur, ou qui sont redondants à de l'information déjà présente à l'affichage. Dans ce cas, l'intention du concepteur d'interface d'offrir plus d'information à l'utilisateur peut avoir un impact négatif sur la performance de ce dernier, car il distrait par l'augmentation de l'encombrement visuel.

Lohrenz et Hansman (2004) ont demandé à 12 pilotes de réaliser une double tâche en simulateur de vol, soit de suivre avec précision le plan de vol et d'identifier un élément au sol. Les participants ont utilisé successivement trois affichages : une carte montrant la position de l'appareil par rapport au sol mais sans le plan de vol, un affichage montrant le plan de vol mais sans la carte, et un affichage mixte montrant la carte et le plan de vol. Les participants ont obtenu la meilleure performance pour les deux tâches en utilisant l'affichage montrant uniquement le plan de vol. Les auteurs en concluent que l'encombrement visuel causé par la présence d'information qui n'est pas nécessaire à la tâche (la carte) a diminué la performance des pilotes sur l'affichage mixte.

La présence d'information redondante à l'affichage contribue aussi à l'encombrement visuel. Il peut s'agir d'une même information répétée à plusieurs endroits à l'écran (Boston & Braun, 1996) ou d'un élément graphique qui n'apporte aucune nouvelle information à l'utilisateur (Alexander et al., 2008), comme par exemple afficher à l'écran de vol le réglage barométrique avec trois unités de pression différentes. Alexander et ses collègues (2008) ont réalisé des entrevues semi-dirigées avec quatre pilotes expérimentés sur l'encombrement visuel de l'affichage de vol. Les auteurs ont trouvé que 10% des commentaires faits par les pilotes ont identifié le facteur de redondance de l'information comme un contributeur de l'encombrement visuel. La présence d'information superflue à la tâche de vol en cours ou offrant peu d'information pour le vol ont été identifiés comme encombrant l'affichage.

Ainsi, le facteur de densité d'information se concentre sur la *tâche* de l'utilisateur et le *contexte* d'utilisation qui rend un affichage encombré tandis que le facteur de densité visuelle considère l'encombrement visuel comme une *propriété* de l'affichage. La présence de symboles inutiles pour la tâche courante contribue à accroître l'encombrement visuel d'un affichage car ils détournent l'attention du pilote de l'information plus importante pour compléter la tâche. La pertinence de l'information pour la tâche est un facteur essentiel de l'encombrement visuel, car les éléments d'information que le pilote peut considérer comme contribuant à l'encombrement visuel pour une tâche particulière durant une phase de vol donnée peuvent être ignorés durant une tâche différente ou une autre phase de vol.

2.2.2.2 Techniques de filtrage

L'abondance d'information présentée à l'utilisateur est une conséquence de l'avancée technologique continue du domaine aérospatial, avec l'ajout à bord du véhicule de nouveaux capteurs et instruments et la croissance de la puissance de calcul des ordinateurs de bord (Woods et al., 2002). Serait-il pertinent d'offrir à l'utilisateur des techniques de filtrage de données, interactives ou automatiques, afin de réduire la charge visuelle à l'écran et mieux soutenir sa tâche? L'utilisation de techniques de filtrage soulève de nouvelles questions liées aux facteurs humains auxquelles il importe de répondre avant de poursuivre dans cette voie.

Le filtrage interactif de données est la possibilité offerte au pilote de masquer une couche d'information à sa demande afin de réduire l'encombrement visuel, par exemple en masquant la couche de trafic aérien sur la carte de terrain (Kroft & Wickens, 2002; Wickens, Kroft, & Yeh,

2000; Yeh & Wickens, 2001). Cette technique s'avère utile lorsque l'écran permet d'afficher l'information sur deux couches superposées physiquement distancée (Hayes, Moore, & Wong, 2006). Toutefois, cette technique a deux désavantages. Premièrement, il y a un coût en temps et en performance pour interagir avec l'application qui peut résulter en une charge de travail accrue (Kroft & Wickens, 2002; Yeh & Wickens, 2001). L'interaction du pilote avec l'écran est du temps passé la tête basse à une tâche autre que le pilotage. Deuxièmement, le pilote peut manquer un événement ou l'apparition d'une nouvelle menace se déroulant sur la couche d'information masquée de l'application, et oublier de consulter ces données masquées. Ce phénomène est connue sous le nom de « loin des yeux, loin de la tête » (*out-of-sight, out-of-mind*) (Podczerwinski, Wickens, & Alexander, 2002). Podczerwinski et ses collègues ont observé une possibilité accrue de manquer un événement se produisant sur la couche d'information masquée de l'application, une manifestation probable du phénomène de loin des yeux, loin de la tête (Podczerwinski et al., 2002).

Le filtrage automatique utilise des algorithmes pour masquer les données superflues et ne présenter qu'un sous-ensemble de toute l'information disponible (Pfautz, Schurr, Ganberg, Bauer, & Scerri, 2011). Par exemple, un tel algorithme utilisé pour l'application de trafic aérien (*Cockpit display of traffic information, CDTI*) ne montrerait sur la carte que les avions les plus proches et filtrerait les avions distants. Bien que cette approche montre ses bienfaits avec le développement d'algorithmes et de règles de filtrages plus puissants, le filtrage automatique n'est pas sans soulever des préoccupations sur la confiance en l'automatisation et ses effets sur la conscience de la situation (Endsley, 1995). Est-ce que les règles de filtrage sont claires et compréhensibles pour le pilote? Est-ce que l'algorithme est déterministe? Est-ce que le pilote demeure conscient de son environnement et capable de détecter de nouvelles menaces? Voici les questions posées par Endsley (1996) dans son travail faisant figure d'autorité sur l'automatisation des systèmes et qui demandent plus d'attention afin de mieux comprendre l'effet du filtrage automatique sur la conscience de la situation.

2.2.3 Organisation d'une interface

L'organisation d'une interface est le regroupement et la hiérarchisation de l'information à l'écran en accord avec la structure de la tâche de l'utilisateur. Cette troisième catégorie peut être à la fois

un contributeur (p. ex. si trop de groupes encombrant l'écran) et un réducteur de l'encombrement si un écran ayant une haute densité est bien structuré.

Burns (2000) a conçu trois écrans de contrôle de centrale nucléaire selon les principes de la conception écologique d'interface (Vicente, 2002). Les résultats montrent que les participants ont été plus rapides à identifier une faille et à la corriger avec l'écran visuellement chargé car il offre une meilleure organisation et une meilleure intégration à la tâche que les écrans moins chargés. Tullis (1984) a trouvé que le temps d'identification d'une panne par les usagers a diminué significativement avec l'écran ayant une meilleure organisation de l'information mais la même densité d'information globale (encombrement visuel). Parush et ses collègues (1998) ont trouvé que l'interface ayant l'information la mieux structurée facilite l'identification de mots-clés à l'écran. Ces résultats sont reproduits pour les pages web et pour deux langues (anglais et hébreu) (Parush et al., 2005).

2.2.3.1 Groupement perceptuel (Gestalt)

La théorie de la Gestalt offre un cadre formel pour étudier l'organisation visuelle de l'interface (Johnson, 2010; Ware, 2004). Celle-ci a été développée au début du XX^e siècle par un groupe de psychologues allemands s'intéressant à la formation de groupes d'objets par la perception humaine. La théorie originale propose six principes expliquant la formation de groupes : proximité spatiale, similarité, relation de fermeture, symétrie, continuité et la bonne forme (Wertheimer, 1938). À ces principes se sont ajoutés ceux de la destinée commune (pour les objets en mouvement) et de l'expérience antérieure de l'observateur (Johnson, 2010). L'organisation d'un affichage en respectant les principes de la Gestalt a été appliquée avec succès en design industriel (Mullet & Sano, 1995) et en design d'interfaces (Chang, Dooley, & Tuovinen, 2002). Un design ne respectant pas les principes de la Gestalt est perçu comme de pauvre qualité et encombré (Fitz, 1993). Récemment, un algorithme a montré son efficacité à reproduire la perception de groupement selon les principes de proximité spatiale, de similitude et de continuité (Rosenholtz, Twarog, Schinkel-Bielefeld, & Wattenberg, 2009). En somme, les principes de groupement perceptuels de la théorie de la Gestalt offrent les consignes de conception pour faciliter le regroupement d'information à l'écran et réduire la perception d'encombrement.

2.2.4 Autres considérations

Plusieurs contributeurs de l'encombrement visuel identifiés dans les études précédentes sont des paramètres objectifs et quantifiables de l'interface, comme la variété de couleurs et de formes. D'autres sont des paramètres subjectifs, comme la qualité esthétique de l'interface. La contribution subjective dans la perception de l'encombrement est à souligner. Certains auteurs vont aussi loin que dire que l'encombrement réside dans le regard de l'utilisateur (*in the eye of the beholder*) (McCrobie, 2000; Neider & Zelinsky, 2011; Pieters, Wedel, & Batra, 2010). La dimension subjective de l'encombrement suggère que l'expérience de l'utilisateur avec l'interface influence sa perception d'encombrement. En effet, Naylor (2010) a trouvé qu'un groupe de pilotes expérimentés (plus de 15 ans d'expérience de vol) jugent plus sévèrement le niveau d'encombrement d'un affichage tête haute qu'un groupe de pilotes avec moins de cinq ans de pratique. Malgré tout, il existe un accord entre les participants sur leur perception d'encombrement. Rosenholtz et ses collègues rapportent un fort accord entre les participants pour le classement de l'encombrement d'une carte géographique, avec un coefficient de concordance de Kendall de 0.72 (Rosenholtz, Li, Mansfield, & Jin, 2005).

Les caractéristiques physiologiques et cognitives de l'utilisateur influencent sa perception de l'encombrement de l'écran (Kaufmann & Kaber, 2010). Kaufmann et Kaber ont corrélié le jugement de l'encombrement fait par un pilote après une tâche en simulateur de vol avec trois caractéristiques individuelles : sensibilité visuelle au contraste, champ de vue utile (*useful field of view*, *UFOV*) et dépendance à la scène (*field dependance*), soit la faculté d'un individu de percevoir les éléments constituant une large scène¹⁴. Les auteurs ont montré que la sensibilité visuelle au contraste est la caractéristique individuelle offrant la meilleure prédiction de la perception d'encombrement par le pilote. Une sensibilité accrue aux basses fréquences spatiales (< 1.5 cycles/deg) est associée à un jugement de l'écran comme plus dense et moins clair. Au contraire, une sensibilité accrue aux hautes fréquences spatiales (> 6 cycles/deg) est associée à un jugement de l'écran comme moins dense et plus clair.

¹⁴ Pour utiliser une image connue, la dépendance à la scène indique si un individu perçoit d'abord les arbres formant la forêt ou s'il perçoit d'abord la forêt avant de voir les arbres.

Des aspects culturels et sociaux sont aussi à prendre en compte dans la perception d'encombrement d'un affichage. La densité de l'information dans la culture asiatique est plus élevée que dans les sociétés occidentales (Chu & Yang, 2010; Fraternali & Tisi, 2008; Rüdiger, 2007). Fraternali et Tisi (2008) utilisent la densité d'information et le nombre d'éléments affichés sur une page comme un marqueur culturel entre les sites web occidentaux et chinois. Chu et Yang (2010) ont montré que la densité d'information accrue d'un site web de commerce en ligne chinois comparativement à sa version occidentale est associée à une moins bonne utilisabilité (temps de recherche d'un objet plus long) mais que les utilisateurs le jugent comme plus digne de confiance car il offre plus de détails. Rüdiger (2007) avance que la densité d'information élevée des sites web chinois est une caractéristique culturelle de ce pays.

Cette section a passé en revue les caractéristiques contribuant à l'encombrement d'un affichage selon trois catégories : la densité visuelle, la densité d'information et l'organisation. La section suivante présente une revue des études passées qui ont utilisé ces propriétés afin de quantifier le niveau d'encombrement d'un affichage, et leur utilité pour la conception d'interfaces.

2.3 Revue des métriques de mesure de l'encombrement d'un affichage

Cette section présente une revue des métriques existantes pour mesurer l'encombrement d'un affichage. Les métriques ont été identifiées par une revue de littérature sur le sujet dans les domaines de l'ergonomie et de l'aérospatial.

Le Tableau 2.2 compare les 29 métriques pertinentes identifiées dans la littérature (Doyon-Poulin & Ouellette, 2011). Nous avons classé les métriques selon la méthode d'analyse employée : algorithme d'analyse d'image, questionnaire, oculométrie (*eye tracker*). Cette classification est différente de celle proposée par (Moacdieh & Sarter, 2012) qui compare les métriques selon les propriétés de l'encombrement mesurées : aspects qualitatifs, aspects quantitatifs, aspects qualitatifs et quantitatifs. Moacdieh et Sarter (2012) ont défini l'aspect quantitatif comme le nombre de symboles à l'écran, alors que l'aspect qualitatif est l'absence d'organisation de l'affichage.

Des 29 métriques répertoriées, 13 sont dans la catégorie algorithme d'analyse d'image, quatre dans la catégorie questionnaire, et 12 dans la catégorie oculométrie.

Tableau 2.2 Métriques d'évaluation de l'encombrement d'un affichage

<i>Métrique</i>	<i>Référence</i>	<i>Description</i>	<i>Attributs évalués</i>	<i>Validé?</i>
Algorithme d'analyse d'image				
<i>Feature congestion</i>	(Rosenholtz et al., 2005, 2007)	Mesure la variation locale de chaque attribut, puis calcule le résultat moyen pour tout l'affichage. Produit une carte d'encombrement de l'affichage source.	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Couleur • Orientation 	Oui
<i>Subband entropy</i>	(Rosenholtz et al., 2007)	Efficacité de l'encodage d'une image, semblable à la compression JPEG. Voir <i>complexité visuelle</i> .	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Couleur • Fréquence spatiale 	Oui
<i>Edge density</i>	(Oliva, Mack, Shrestha, & Peeper, 2004; Rosenholtz et al., 2007)	Densité de pixels à l'écran correspondant à la frontière d'un objet. Calculé à l'aide de l'algorithme de segmentation d'image Canny.	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Orientation 	Oui
<i>Color-clustering clutter (C3)</i>	(Lohrenz et al., 2009)	Homogénéité locale des attributs, moyennée pour tout l'affichage.	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Couleur 	Oui
<i>Scale invariance</i>	(Bravo & Farid, 2008)	Estime le nombre d'objets distincts à l'affichage à l'aide d'un algorithme de segmentation d'image.	<ul style="list-style-type: none"> • Couleur 	Oui
<i>Crowding</i>	(van den Berg et al., 2009)	Évalue la perte d'information de l'affichage causée par la plus faible acuité visuelle dans le champ de vision périphérique par une mesure d'entropie.	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Couleur • Orientation • Taille 	Oui

Tableau 2.2 Métriques d'évaluation de l'encombrement d'un affichage (suite)

<i>Métrique</i>	<i>Référence</i>	<i>Description</i>	<i>Attributs évalués</i>	<i>Validé?</i>
<i>Stabilité perceptuelle</i>	(Bennett, 2009)	Mesure la résilience d'un affichage à présenter une information perceptible malgré la perte d'acuité visuelle.	<ul style="list-style-type: none"> • Couleur • Contraste • Fréquence spatiale. 	Partiel
<i>Densité d'information</i>	(Tullis, 1983, 1984)	Pourcentage de l'écran affichant du texte à l'échelle globale (tout l'écran) et à l'échelle locale (autour d'un caractère).	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de caractères 	Oui
<i>Complexité de présentation</i>	(Comber & Maltby, 1996, 1997)	Évalue l'homogénéité de la présentation d'une interface graphique. Résultat en pourcentage.	<ul style="list-style-type: none"> • Taille • Alignement 	Partiel
<i>Complexité visuelle</i>	(Donderi & McFadden, 2005; Donderi, 2006)	Utilise la taille du fichier JPEG d'une image comme mesure de son entropie. La compression JPEG est plus efficace avec une image ayant peu de symboles, et vice-versa.	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Couleur • Fréquence spatiale 	Oui
<i>Ratio signal-bruit</i>	(Darkow & Marshak, 1998)	Étant donné un symbole à identifier sur une carte, donne une mesure de sa distinction et sa clarté par rapport à l'arrière-plan.	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Couleur • Fréquence spatiale 	Oui
<i>Mesure d'encombrement normalisée</i>	(Waldman, Wootton, Hobson, & Luetkemeyer, 1988)	Densité d'objets sur un affichage similaire à l'objet d'intérêt à identifier. Applicabilité partielle pour une interface utilisateur.	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Orientation • Taille 	Oui

Tableau 2.2 Métriques d'évaluation de l'encombrement d'un affichage (suite)

<i>Métrique</i>	<i>Référence</i>	<i>Description</i>	<i>Attributs évalués</i>	<i>Validé?</i>
<i>Saillance</i>	(Zuschlag, 2004)	Distinction du symbole d'intérêt (FPV) et de son entourage à l'écran. Développé pour un HUD d'avion	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste • Orientation 	Non
Questionnaire				
<i>Analyse conjointe</i>	(McCrobie, 2000)	L'utilisateur compare une série d'écrans de vol deux à deux et les classe selon l'utilité des fonctions présentes et le niveau d'encombrement de l'affichage. Le test statistique, dit d'analyse conjointe, détermine quelles fonctions contribuent le plus à l'encombrement. Utilisé avec un écran de vol PFD.	<ul style="list-style-type: none"> • Encombrement global • Utilité de la fonction 	Oui
<i>Évaluation subjective</i>	(Bailey et al., 2006; Bolton & Bass, 2009)	Après avoir utilisé l'écran PFD en simulateur de vol, le pilote juge le niveau d'encombrement de l'affichage sur une échelle de Likert.	<ul style="list-style-type: none"> • Encombrement global • Attention visuelle • Compréhension 	Oui
<i>Clutter Rating Scale</i>	(Alexander, Stelzer, Kim, Kaber, & Prinzel III, 2009; Kaber et al., 2008)	Semblable au NASA-TLX. L'utilisateur compare la contribution à l'encombrement d'une paire de descripteurs, puis évalue la caractéristique de chaque descripteur. De loin la métrique la plus développée et validée.	<ul style="list-style-type: none"> • Densité • Saillance • Couleur • Redondance • Variabilité • Dynamique 	Oui
<i>Questionnaire de complexité</i>	(Ling, Lopez, & Shehab, 2011; Xing, 2007)	Évaluation subjective de trois dimensions de la complexité d'un affichage (perceptuelle, cognitive, action) chacune décomposée en trois facteurs (quantité, variété, relation). Méthode développée pour les écrans de contrôleurs aériens.	<ul style="list-style-type: none"> • Groupes • Attributs visuels • Encombrement 	Oui

Tableau 2.2 Métriques d'évaluation de l'encombrement d'un affichage (suite)

<i>Métrique</i>	<i>Description</i>	<i>Observations</i>
<i>Oculométrie. Tous les résultats sont tirés de (Moacdieh & Sarter, 2012)</i>		
<i>Nombre de fixation</i>	Un nombre élevé de fixations indique que l'utilisateur cherche activement sur l'écran, plutôt que de se concentrer sur une région particulière.	Utile pour une tâche où il faut minimiser le temps de recherche à l'écran. Utilité limitée pour une tâche de pilotage où l'attention est partagée entre plusieurs instruments.
<i>Temps cumulatif de fixations sur la cible</i>	Un niveau d'encombrement local élevé demande à l'utilisateur d'observer plus longtemps la cible pour l'identifier.	Nécessite de définir une cible. Un temps cumulatif élevé pour une tâche de pilotage signifie aussi une concentration accrue sur la cible.
<i>Nombre ou pourcentage de fixations sur la cible</i>	Un nombre de fixations élevé sur la cible indique que l'utilisateur a eu de la difficulté à la distinguer de son entourage.	Nécessite de définir une cible. En aviation, il est préférable de maintenir le balayage visuel des instruments à d'éviter la distraction par les symboles inutiles à la tâche.
<i>Nombre de regards sur la cible</i>	Similaire au nombre de fixations sur la cible, sauf qu'il ajoute le nombre de saccades au-dessus de la cible.	Méthode similaire au nombre de fixations sur la cible.
<i>Temps entre la première fixation sur la cible et son identification</i>	Pour un affichage ayant un encombrement élevé, identifier la cible peut prendre du temps malgré l'avoir déjà observé.	Nécessite de définir une cible. Mesure pertinente pour une tâche de recherche, mais s'applique difficilement à la tâche de pilotage.
<i>Temps pour la première fixation sur la cible</i>	Un symbole sur un affichage encombré prend plus de temps à être identifié.	Nécessite de définir une cible. Mesure pertinente pour une tâche de recherche, mais s'applique difficilement à la tâche de pilotage.

Tableau 2.2 Métriques d'évaluation de l'encombrement d'un affichage (suite)

<i>Métrique</i>	<i>Description</i>	<i>Observations</i>
<i>Temps moyen de fixation</i>	Un affichage encombré nécessite des fixations plus longues de l'utilisateur pour discerner les symboles à l'écran.	Un temps moyen de fixation élevé indique aussi un parcours visuel moins efficace, car l'utilisateur met plus de temps pour observer un symbole.
<i>Longueur du parcours visuel</i>	La longueur du parcours visuel est la distance totale parcourue par le regard entre la première et la dernière fixation.	Une longueur du parcours visuel court indique que l'affichage facilite le balayage visuel et réduit la distraction de l'utilisateur.
<i>Longueur moyenne d'une fixation</i>	Une distance de fixation longue indique que l'affichage facilite le parcours visuel. La distance sera plus courte pour un affichage encombré car l'utilisateur doit fixer chaque élément.	Un affichage d'avion doit faciliter le parcours visuel du pilote. Il est préférable que la longueur moyenne d'une fixation soit grande.
<i>Surface de l'enveloppe convexe</i>	L'enveloppe convexe est la plus petite surface entourant tous les points de fixation. Une petite surface indique une recherche plus efficiente.	Mesure pertinente pour la tâche de pilotage car indicative de la surface observée par le pilote et du potentiel de distraction de l'affichage.
<i>Densité spatiale</i>	Divise l'écran en une grille et calcule le nombre de cellules contenant au moins une fixation par le nombre total de cellules de la grille. Une densité faible indique une recherche efficiente.	Liberté sur la définition de la taille des cellules.
<i>Ratio de transition</i>	Similaire à la densité spatiale, mais utilisant le nombre de cellules ayant au moins une transition (entrant ou quittant la cellule).	Liberté sur la définition de la taille des cellules.

2.3.1 Algorithme d'analyse d'image

Les métriques de la catégorie algorithme d'analyse d'image fonctionnent toutes selon le même paradigme : l'algorithme reçoit en entrée une prise d'écran de l'affichage à évaluer, calcule la densité ou la lisibilité des objets présents et retourne en sortie un scalaire (nombre) ou une carte de visualisation indiquant le degré d'encombrement de l'affichage. Notez que la métrique obtenue en sortie est indépendante du domaine de travail, c'est-à-dire que l'algorithme ne connaît pas le domaine d'utilisation de l'affichage (aviation, site web, etc.), ni son contexte d'utilisation.

Les sept premières métriques du Tableau 2.2 appliquent une série de filtres sur l'affichage obtenue en entrée, reproduisant les processus précoces de la vision humaine. Les algorithmes évaluent la variété locale des attributs visuels (Lohrenz et al., 2009; Rosenholtz et al., 2005, 2007), le nombre d'objets à l'écran (Bravo & Farid, 2008; Rosenholtz et al., 2007) ou la perte d'information en vision périphérique (Bennett, 2009; van den Berg et al., 2009). À l'exception de (Bennett, 2009), la mesure de l'encombrement de chaque métrique a été validée expérimentalement et montre une corrélation fortement significative avec le temps de recherche d'une cible à l'écran.

Rosenholtz et ses collègues ont montré l'utilité d'algorithmes de mesure et de visualisation de l'encombrement basés sur les processus de vision humaine (Rosenholtz, Dorai, & Freeman, 2011). Les auteurs ont donné accès à leur logiciel *Feature Congestion* à 40 participants travaillant dans 10 firmes de design. Leur étude de terrain montre des résultats surprenants. La majorité des participants ont exprimé un besoin évident d'un tel outil pour les aider dans leur travail. La visualisation de la carte d'encombrement est utilisée par les concepteurs d'interfaces pour donner un vocabulaire commun aux différentes parties prenantes de la firme (concepteurs, gestionnaires, clients) pour savoir quels éléments contribuent le plus à encombrer l'affichage. De plus, les participants ne perçoivent pas la métrique d'encombrement comme un oracle devant guider leur travail, mais plutôt comme une étincelle pour démarrer la discussion avec les parties prenantes pour justifier les décisions de conception (voir aussi Altaboli & Lin, 2011).

Les métriques d'encombrement suivantes analysent l'homogénéité de la disposition des éléments graphiques de l'interface, p. ex., bouton, libellé, menu, dialogue, etc. Une interface homogène avec des objets de taille uniforme et disposés sur une grille est jugée comme moins encombrée. Ces métriques ont été développées expressément pour la conception d'interface. Comber et

Maltby (1996, 1997) mesurent la taille et le nombre d'alignements de tous les éléments graphiques, puis calculent l'entropie de ces distributions. Cette méthode est reprise dans plusieurs travaux en IHM pour évaluer la complexité d'une interface (Forsythe, 2009; Miyoshi & Murata, 2001; Noble & Constantine, 1996; Wu, Chen, Li, & Hu, 2010; Zheng, Chakraborty, Lin, & Rauschenberger, 2008). Donderi utilise aussi l'entropie de l'interface comme une mesure de son désordre et de sa complexité visuelle (Donderi & McFadden, 2005; Donderi, 2006). Darkow et Marshak (1998) mesurent l'apport en information de l'ajout d'un élément graphique avec le ratio signal sur bruit obtenu de l'amplitude du signal spectral de l'image. Tullis (1983, 1984) utilise la densité d'information, soit la fraction de pixels à l'écran utilisés pour afficher de l'information, comme mesure d'encombrement. La densité est évaluée à l'échelle globale (tout l'écran) et locale (au voisinage d'un caractère). Ces métriques ne s'appliquent toutefois qu'à un affichage alphanumérique (texte uniquement) et ne tiennent pas compte de la signification de l'information affichée. Pour une revue des critiques des métriques de Tullis, voir (Mayhew, 1992).

Waldman et ses collègues (1988) analysent le contraste des pixels pour trouver des objets de taille et d'orientation similaire à une cible. Cette métrique nécessite de définir un objet ou une cible qui doit être discernable malgré l'encombrement de l'écran. Zuschlag (2004) applique ce principe au HUD de l'avion en définissant le FPV comme la cible à distinguer. La métrique d'encombrement proposée mesure la similarité en couleur et en orientation entre le FPV et les objets à l'extérieur de l'avion. Toutefois, sa métrique n'a pas été validée expérimentalement.

2.3.2 Questionnaire

Alors que les métriques précédentes évaluent l'encombrement selon la quantité et la variété de symboles à l'écran, les métriques de la catégorie questionnaire offrent aussi d'évaluer l'encombrement provenant d'une information redondante ou d'une mauvaise organisation de l'écran. Dans ce cas, l'utilisateur complète un questionnaire après avoir utilisé l'affichage en situation réelle, par exemple après avoir complété une phase d'approche en simulateur de vol. On remarque que ces quatre métriques sont les seules impliquant une évaluation subjective réalisée par l'utilisateur de l'affichage.

McCrobie (2000) demande à des pilotes d'évaluer la pertinence et l'encombrement de deux écrans ayant des fonctions et une densité différente, puis répète cette évaluation pour toutes les combinaisons d'écrans. La méthode statistique dite de l'analyse conjointe permet d'identifier la

fonction contribuant le plus à l'encombrement de l'écran. L'évaluation subjective d'un écran par des pilotes sur une échelle de Likert est une autre méthode employée dans le domaine de l'avion. Bailey et ses collègues utilisent un questionnaire après une tâche de vol pour évaluer l'encombrement perçu par le pilote selon quatre points : demande visuelle, ressources visuelles disponibles, compréhension de l'écran et encombrement global de l'écran (Bailey et al., 2006). Bolton et Bass (2009) ne posent qu'une seule question sur le niveau d'encombrement global de l'écran. Kaber et ses collègues (Kaber et al., 2008) ont développé une échelle d'évaluation de l'encombrement (*clutter rating scale*), similaire au NASA-TLX pour l'évaluation de la charge de travail mentale, comprenant trois descripteurs pour les caractéristiques de l'écran (densité, saillance, couleur) et trois descripteurs pour la pertinence de l'information (redondance, variabilité, dynamique). Le pilote compare d'abord chaque paire de descripteurs pour identifier celui contribuant le plus à l'encombrement, puis évalue chaque descripteur sur une échelle de Likert. La métrique d'encombrement global est la moyenne du résultat de l'échelle de Likert, pondérée par la force de chaque descripteur obtenu de la comparaison par pair. La métrique développée par l'équipe du professeur Kaber a été validée expérimentalement à plusieurs reprises (Alexander et al., 2012, 2008; Kim et al., 2011).

Xing (2007) a développé un questionnaire pour évaluer la complexité visuelle des terminaux des contrôleurs aériens (*Air traffic controller, ATC*), dans lequel l'encombrement visuel est une dimension. Par la suite, Ling et ses collègues ont adapté le vocabulaire du questionnaire pour l'utiliser avec un site web (Ling et al., 2011). Leur étude montre que le questionnaire modifié mesure bien la propriété de complexité visuelle des sites web testés. Bien que la portée de ce questionnaire dépasse la seule mesure de l'encombrement visuel, il est intéressant de voir comment un questionnaire peut être adapté à un autre domaine d'application en modifiant le vocabulaire.

2.3.3 Oculométrie

Jusqu'à récemment, la technique d'oculométrie a été utilisée afin de *valider* la métrique d'encombrement (Cardaci, Di Gesù, Petrou, & Tabacchi, 2009) ou afin de quantifier *l'effet* de l'encombrement visuel d'un affichage sur l'allocation de l'attention de l'utilisateur (Beck, Lohrenz, & Trafton, 2010; Henderson, Chanceaux, & Smith, 2009). Moacdieh et Sarter (2012) ont proposé d'employer la technique d'oculométrie afin de *mesurer* l'encombrement. Dans leur

étude, les auteurs ont trouvé que les résultats de 12 des 14 métriques évaluées sont corrélés au niveau d'encombrement des stimuli employés (tous les $ps < 0.01$). Les 12 métriques retenues sont présentées dans le Tableau 2.2.

Les métriques calculant le nombre de fixations ou le temps pour fixer la cible sont difficilement applicables à une expérience sur les affichages de l'avion. Dans ce cas, le pilote réalise un parcours visuel en boucle (Henderson, 2003) afin de vérifier et corriger la valeur des différents indicateurs (vitesse, altitude, direction, etc.). Les métriques mesurant la longueur du parcours visuel ou la surface observée par le pilote sont plus pertinentes pour notre expérience, car elles renseignent sur la distraction causée par l'encombrement de l'écran et la facilité qu'a le pilote à parcourir tous les indicateurs pertinents pour le vol.

2.3.4 Synthèse

La majorité des métriques de la catégorie algorithme d'analyse d'image évaluent la dimension visuelle de l'encombrement, soit la quantité et la variété d'attributs visuels de l'affichage. De celles-ci, la métrique de complexité visuelle (Donderi & McFadden, 2005) est facile d'utilisation – il suffit d'évaluer la taille du fichier JPEG de l'interface – et la métrique *Feature congestion* (Rosenholtz et al., 2007) a été validée avec la perception subjective de l'encombrement en plus d'être disponible dans le domaine public. Pour évaluer la dimension cognitive de l'encombrement, soit la pertinence de l'information à la tâche, le *clutter rating scale* (Kaber et al., 2008) semble la métrique la plus pertinente pour ce travail car elle est multidimensionnelle, elle a été développée pour l'aviation et son mode d'emploi est expliqué dans les publications associées. L'utilisation d'une métrique d'oculométrie serait aussi avisée, car elle renseigne sur l'allocation attentionnelle de l'utilisateur devant l'écran.

2.4 Effets de l'encombrement sur la performance

L'élaboration d'une définition et de métriques pour mesurer l'encombrement prend tout son sens lorsque l'on étudie l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de l'utilisateur. Cette section présente une revue de littérature des effets de l'encombrement visuel sur la performance pour deux groupes de tâches : la prospection visuelle et le pilotage d'avion.

Nous montrons que les effets de l'encombrement visuel sur la performance de l'utilisateur dépendent de la tâche réalisée (Doyon-Poulin, Ouellette, & Robert, 2012). Alors que les études précédentes ont montré une diminution marquée de la performance pour une tâche de prospection visuelle, les effets de l'encombrement visuel du PFD sur le pilotage de l'avion sont mixtes. Nous expliquons cette différence par le fait que les études précédentes n'ont pas manipulé la variable d'encombrement visuel d'une manière similaire. Pour ce faire, nous formulons trois exigences que devraient respecter les prochaines expériences sur l'encombrement visuel.

2.4.1 Prospection visuelle

La prospection visuelle est une tâche canonique en psychologie expérimentale. Le participant doit indiquer, le plus rapidement possible, si une cible est présente à l'écran; par exemple trouver à l'écran la lettre 'T' de couleur rouge. Le temps de réaction (*Reaction time*, RT) augmente en fonction du nombre de cibles distrayantes (*distractors*) présentes, c'est-à-dire d'objets partageant au moins un attribut en commun avec la cible recherchée, par exemple des 'T' verts et des 'L' rouges (Eckstein, 2011; Treisman & Gelade, 1980).

La diminution de la performance en recherche est aussi observée pour des affichages complexes semblables à ceux utilisés dans le domaine de l'aviation. Palmer et ses collègues ont développé un affichage, semblable à celui utilisé par les contrôleurs aériens, présentant plusieurs avions survolant l'espace aérien à différentes altitudes et directions (Palmer, Clausner, & Kellman, 2008). Les participants devaient rapporter le plus rapidement possible si une collision entre un avion « cible » et son environnement allait se produire. Un libellé voisin du symbole d'avion indique son altitude. Les auteurs ont trouvé que le temps de décision augmente avec le nombre d'avions présentés à l'écran, une manifestation de l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de la prospection visuelle. Les auteurs ont aussi testé l'efficacité du codage visuel de l'altitude en modifiant la taille et le contraste du symbole de l'avion. Ils ont trouvé que le codage redondant de l'altitude offre une décision plus rapide et plus précise que le symbole d'avion avec le libellé seul.

Une augmentation du temps de réaction est aussi observée pour des stimuli visuels complexes où il est difficile de dénombrer, voire de définir, les cibles distrayantes (Beck et al., 2010; Beck, Trenchard, Lamsweerde, Goldstein, & Lohrenz, 2012; Rosenholtz et al., 2007). C'est le cas d'une recherche visuelle sur une carte géographique, par exemple. En tel cas, quels symboles ou

groupes de symboles sont considérés comme des cibles distrayantes : le nombre de montagnes, de routes, de rivières (voir aussi Phillips & Noyes, 1982)? Dans ces études récentes, les auteurs remplacent la notion de cibles distrayantes par celle d'encombrement visuel.

Une illustration convaincante de cette transition entre le nombre de cibles distrayantes et le niveau d'encombrement est présentée dans l'étude de (Bravo & Farid, 2008). Les participants doivent trouver un objet commun (p. ex., iPod, cellulaire, trousseau de clés, etc.) sur une photographie naturelle contenant plusieurs objets disposés de manière disparate¹⁵. Le niveau d'encombrement de la photographie était mesuré par une méthode de segmentation d'image à différentes échelles spatiales¹⁶. Bravo et Farid ont trouvé que le temps de recherche augmente avec le niveau d'encombrement de la photographie. Le niveau d'encombrement visuel global de la photographie explique 38% de la variance dans le temps de réponse. Les auteurs soulignent que bien que cette relation soit significative, d'autres facteurs que l'encombrement peuvent expliquer la variation de la performance, comme l'organisation de la scène et l'occlusion partielle des objets présents. Ces autres facteurs n'étaient pas contrôlés dans l'étude de (Bravo & Farid, 2008).

L'intérêt d'utiliser le niveau d'encombrement plutôt que le nombre de cibles distrayantes pour caractériser la performance d'une tâche de prospection visuelle est à l'origine de plusieurs études en vision. Rosenholtz et ses collègues ont trouvé que le temps de recherche d'une cible sur une carte géographique est proportionnel au niveau d'encombrement global de la carte (Rosenholtz et al., 2007). Les auteurs rapportent une bonne corrélation entre le temps de recherche et le niveau d'encombrement ($r = 0.74$, $p < 0.001$ pour les essais avec cibles présentes). Ils ont aussi trouvé que les participants mettent plus de temps pour trouver la cible sur une image en couleur que

¹⁵ Étonnamment, les photographies sont tirées du site web de partage de photo Flickr. Les usagers ont photographié le contenu de leur sac à dos ou sac à main. Il n'y avait donc que peu de contrôle sur les objets présents et leur disposition.

¹⁶ La segmentation est contrôlée par un paramètre K qui s'apparente à la grosseur de grain de l'image. Bravo et Farid (2008) ont répété la segmentation en variant le paramètre K , ce qui a donné un nombre élevé d'objets pour une granularité fine et un nombre faible d'objets pour une granularité grossière. La mesure d'encombrement est le coefficient de la meilleure régression d'une loi de puissance entre le nombre d'objets et la valeur du paramètre K .

monochrome. Ces résultats sont intéressants parce qu'ils montrent une diminution de performance avec un accroissement du niveau d'encombrement pour des images complexes.

Beck et collègues ont contrôlé le niveau d'encombrement global (toute l'image) et local (à proximité de la cible) de cartes de navigation aérienne (Beck et al., 2010). La cible recherchée par les participants était un triangle simple représentant une montagne. Les auteurs ont été astucieux en manipulant le nombre de cibles distrayantes (un triangle double) en plus de l'encombrement. Les résultats sont convaincants : les auteurs ont trouvé que le temps de recherche de la cible augmente en fonction du niveau d'encombrement global de la carte. Le nombre d'erreurs dans la réponse (rapporter une cible absente alors qu'elle est présente) augmente aussi avec le niveau d'encombrement global. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes. Beck et al (2010) ont de plus montré que la diminution de performance associée à l'encombrement global se fait particulièrement sentir pour un encombrement local élevé. L'encombrement global explique 53% de la variance du temps de réponse pour les essais avec un encombrement local élevé, alors que l'encombrement local explique 52% de la variance pour tous les niveaux d'encombrement global. Accroître la saillance de la cible, avec une couleur et une luminosité distinctive de l'arrière-plan par exemple, diminue cet effet. Le point important de l'étude de (Beck et al., 2010) est que l'impact du nombre de cibles distrayantes sur le temps de recherche n'est pas significatif. Ces résultats montrent un effet clair de l'encombrement global et local sur la performance humaine, et que le niveau d'encombrement de la scène est un meilleur descripteur que le nombre de cibles distrayantes pour mesurer l'effet sur la performance humaine.

Henderson et ses collègues ont offert les premiers résultats montrant que le parcours visuel durant une tâche de prospection sur une scène est influencé par le degré d'encombrement visuel (Henderson et al., 2009). Les participants doivent identifier la présence d'une lettre (la cible) placée de façon aléatoire sur une photographie d'une scène extérieure. Les auteurs ont utilisé la métrique de *Feature congestion* (Rosenholtz et al., 2007) pour évaluer l'encombrement de la scène. Ils ont trouvé que le niveau d'encombrement global de la scène est significativement corrélé avec le temps de recherche ($R^2 = 0.27$, $p < 0.001$) et le nombre d'erreurs dans la réponse ($R^2 = 0.16$, $p < 0.005$). Henderson et collègues ont aussi trouvé que le temps moyen d'une fixation visuelle est proportionnel au niveau d'encombrement global ($R^2 = 0.08$), mais la relation n'est pas significative pour l'encombrement local autour de la fixation ($R^2 = 0.00$). Les auteurs rapportent aussi que les deux premières fixations visuelles du participant sont posées sur des

régions ayant un niveau d'encombrement local supérieur au niveau d'encombrement local moyen de la scène. Globalement, ces résultats indiquent une influence du niveau d'encombrement sur les stratégies de recherche visuelle du participant, bien que le niveau de corrélation soit modéré ou faible.

Lohrenz et Beck (2010) ont montré que les participants évitent les régions d'encombrement local élevé et n'y dirigent leur regard que s'ils ont échoué à trouver la cible dans des régions d'encombrement local plus faible. Dans cette étude, les auteurs ont utilisé les mêmes cartes aéronautiques que dans leur étude précédente (Beck et al., 2010). Un appareil d'oculométrie (*eye tracker*) a mesuré le parcours visuel des participants. Ce résultat complète celui de (Henderson et al., 2009) en montrant que le regard du participant débute dans une région ayant un encombrement local modéré, car cette région est susceptible de contenir plus d'information qu'une région ayant un encombrement local faible. Il se peut aussi que la saillance locale de la région puisse attirer le regard du participant, la saillance étant construite avec les mêmes paramètres que l'encombrement local (Itti, Koch, & Niebur, 1998).

Alors que l'étude de (Lohrenz & Beck, 2010) a fait appel à des participants novices à la tâche, c'est-à-dire n'ayant aucune expérience dans l'utilisation de cartes aéronautiques, l'étude suivante du groupe de Beck a comparé l'effet de l'encombrement visuel sur les stratégies de recherche entre un groupe de pilotes expérimentés et un groupe d'observateurs novices (Beck et al., 2012). Ces résultats reproduisent les résultats précédents où le temps de détection et le nombre d'erreurs augmentent avec le niveau d'encombrement global et local (Beck et al., 2010; Lohrenz & Beck, 2010). Toutefois, les pilotes expérimentés dans l'utilisation de cartes aéronautiques sont plus lents et plus précis que les observateurs novices dans leur réponse pour les essais avec un encombrement global élevé. Les pilotes consacrent aussi plus de temps à chaque fixation que les observateurs novices, indiquant qu'ils consacrent plus de temps à extraire l'information présente à chaque fixation. Ces résultats suggèrent que les pilotes emploient un critère de réponse plus conservateur que les observateurs novices afin de réduire le nombre d'erreurs. L'étude de (Beck et al., 2012) est pertinente car elle montre que les utilisateurs experts sont aussi sensibles à l'effet de l'encombrement visuel sur la performance dans une tâche de prospection visuelle.

2.4.1.1 Synthèse

Le Tableau 2.3 présente les principaux résultats des études passées en revue. Ceux-ci montrent clairement qu'une augmentation de niveau d'encombrement visuel diminue la performance pour une tâche de prospection visuelle, autant pour le temps de détection que la validité de la réponse. L'encombrement visuel influe aussi sur la stratégie de recherche des participants : le regard se pose d'abord sur une région ayant un encombrement local plus élevé que sur l'ensemble de la scène (Henderson et al., 2009), probablement car il s'agit d'une région offrant plus d'informations pour commencer la recherche qu'une région ayant un niveau d'encombrement local faible. Le regard du participant se dirige sur une région ayant un encombrement local élevé s'il a failli à trouver la cible dans une région ayant un encombrement modéré (Lohrenz & Beck, 2010).

Tableau 2.3 Effet de l'encombrement sur la performance pour une tâche de prospection visuelle

<i>Étude</i>	<i>Stimuli</i>	<i>A trouvé que</i>	<i>Meilleure performance</i>
(Palmer et al., 2008)	Écrans de contrôleur aérien	Temps de recherche proportionnel au nombre d'avions.	Faible encombrement
(Rosenholtz et al., 2007)	Cartes météorologiques	Temps de recherche proportionnel à l'encombrement.	Faible encombrement
(Henderson et al., 2009)	Scènes extérieures	Temps de recherche proportionnel à l'encombrement.	Faible encombrement
(Beck et al., 2010)	Cartes aéronautiques	Temps de recherche proportionnel à l'encombrement.	Faible encombrement
(Beck et al., 2012)	Cartes aéronautiques avec pilotes experts	Temps de recherche proportionnel à l'encombrement.	Faible encombrement

Ensemble, ces résultats indiquent un modèle granulaire de prospection visuelle (Beck et al., 2012). La vision périphérique pré-attentive dirige d'abord le regard vers une zone localement dense, car elle promet un gain en informations supérieur à une zone pauvre en symboles (Henderson et al., 2009). Le temps d'une fixation visuelle est proportionnel au degré d'encombrement local, il est donc avantageux de chercher en premier des zones ayant un

encombrement local modéré (Lohrenz & Beck, 2010). Le participant dirige son regard vers les zones ayant un encombrement local élevé par la suite.

2.4.1.2 Limitations

Les résultats des études présentées dans cette section sont soumis à certaines limitations. Premièrement, les études se déroulent dans un environnement contrôlé où le participant dévoue son attention à une seule tâche : trouver une cible à l'écran. L'environnement est absent de distractions visuelles ou sonores qui peuvent influencer le temps de réponse du participant, par exemple communiquer avec la tour de contrôle ou surveiller l'apparition d'une panne en vol.

Deuxièmement, la cible était positionnée aléatoirement sur l'illustration utilisée comme stimulus visuel, et l'illustration n'offrait aucun signe de guidage qui aurait pu faciliter ou influencer la détection de la cible par les participants. Ce constat est important, car les applications développées à l'intention des pilotes sont structurées de manière à faciliter le repérage des groupes d'informations pertinents pour la tâche de vol. Une telle organisation de l'espace visuel est absente des études présentées.

Troisièmement, chaque étude a utilisé plusieurs dizaines de stimuli, chacun ayant un niveau d'encombrement différent. Utiliser plusieurs stimuli offre une étendue variée du niveau d'encombrement et une meilleure puissance statistique pour l'analyse des résultats. La tâche de prospection est rapide à compléter (généralement moins d'une minute par essai) et chaque essai est indépendant des autres, ce qui explique la facilité d'utiliser plusieurs stimuli. Ce n'est toutefois pas le cas des études sur l'effet de l'encombrement sur la conduite de l'avion, présentées à la section suivante. Dans ce cas, le participant répète les essais en utilisant de deux à quatre écrans, ce qui limite la possibilité d'incrémenter finement le niveau d'encombrement de l'affichage.

2.4.2 Conduite de l'avion

L'effet de l'encombrement visuel du PFD sur la performance de la conduite de l'avion a fait l'objet de plusieurs études. Cette section en fait la revue. Le point commun de ces études est de demander à un groupe de pilotes expérimentés de réaliser une série de manœuvres de contrôle d'avion – réaliser une phase d'approche ou un virage serré – en simulateur de vol. L'affichage du PFD est modifié entre les essais en chargeant ou allégeant la densité d'information, afin de tester l'effet de l'encombrement visuel à l'écran. L'écran offrant la meilleure performance est celui qui

minimise l'erreur technique de vol (*Flight technical error, FTE*), soit la déviation en position et en vitesse du trajet prévu dans le plan de vol.

Nous montrerons que les résultats obtenus dans les études passées sont mixtes, c'est-à-dire que certaines études obtiennent une meilleure performance avec un écran encombré, alors que d'autres n'observent pas d'effet de l'encombrement visuel. Nous expliquons ces différences par le fait que les études passées n'ont pas manipulé la variable d'encombrement visuel de manière semblable. À la lumière de cette nouvelle explication, nous formulons trois exigences que tous les affichages devraient respecter afin de contrôler la variable d'encombrement visuel.

Ververs et Wickens n'ont observé aucun effet de l'encombrement de l'écran sur la qualité du contrôle de l'avion (Ververs & Wickens, 1998). L'affichage avec un encombrement faible présentait l'information minimale de vol alors que l'affichage avec un encombrement élevé avait des informations non pertinentes en périphérie de l'écran (libellés additionnels, horloge, indicateur de vent)¹⁷. Les auteurs ont toutefois trouvé que l'encombrement visuel de l'écran du pilote diminue la performance pour la détection d'évènements pour le champ de vision proche – coût de 0.47 seconde pour la détection d'un changement de symbologie à l'écran – et pour le champ de vision lointain – coût de 0.27 secondes pour la détection de trafic – et ce, tant pour l'affichage tête haute que l'affichage tête basse. Une condition d'affichage intermédiaire où la saillance de l'information périphérique non-pertinente était réduite en diminuant son contraste a significativement augmenté le temps de détection comparativement à l'affichage minimal (coût de 0.41 secondes pour la détection d'un changement de symbologie et de 0.29 secondes pour la détection de trafic). Ce résultat est toutefois contraire à ceux obtenus précédemment par (Ververs & Wickens, 1996) qui ont montré que diminuer la saillance des éléments non-pertinents de l'affichage tête haute tout en conservant la saillance des éléments pertinents élevés procure une performance équivalente à celle de l'écran avec l'information minimale pour la détection d'évènements dans le champ lointain. Ververs et Wickens (1998) ont toutefois observé que la condition intermédiaire a permis d'améliorer la détection du trafic pour l'affichage tête basse. Ce

¹⁷ Tel que mentionné à la section 1.2.1, l'information minimale de vol est l'indicateur d'attitude (tangage et roulis), le compas, l'indicateur de vitesse et d'altitude.

dernier résultat suggère que modifier la saillance de l'information a permis de libérer les ressources attentionnelles alloués à l'écran pour le balayage de l'environnement extérieur.

Wickens et ses collègues ont comparé l'avantage de réduire le parcours visuel du pilote en combinant toute l'information présente sur le PFD sur un même affichage plutôt que sur des affichages séparés (Wickens, Alexander, Horrey, Nunes, & Hardy, 2004). Les auteurs ont aussi manipulé la fonction de guidage du PFD en comparant un affichage tunnel (*tunnel*) à un affichage avec les commandes présentées sous forme textuelle (*datalink*). Ainsi, l'écran ayant la plus grande densité d'information est celui du tunnel avec l'information primaire superposée, alors que l'écran le moins dense est celui du *datalink* avec l'information primaire séparée. Wickens et ses collègues ont trouvé que superposer le tunnel et l'information primaire améliore le contrôle de l'avion, avec un bénéfice de 25 m verticalement et 20 m latéralement comparativement à la condition du *datalink* séparée, bien que l'affichage du tunnel soit plus encombré que l'écran où la même information est séparée. La détection de trafic aérien a aussi bénéficié de la vue du tunnel superposée, diminuant de 16 à 11 secondes.

Dans une autre étude, Alexander et ses collègues ont comparé trois modalités de présentation de la fonction de guidage sur un affichage tête basse: tunnel avec faible luminosité (*lowlighted*), tunnel avec forte luminosité (*highlighted*) et un affichage avec le couple FPV et FD (Alexander, Wickens, & Hardy, 2005). L'affichage avec le FPV et FD est considéré comme le moins encombré car la symbologie occupe moins d'espace à l'écran et est composée de moins d'attributs que celle du tunnel. Vingt-quatre pilotes ont réalisé une approche courbe en simulateur avec chaque affichage. Les auteurs ont trouvé que l'affichage tunnel avec faible contraste offre un meilleur contrôle vertical de l'avion que l'affichage avec FPV et FD, mais n'ont observé aucune différence pour le temps de détection du trafic. L'affichage tunnel avec faible contraste offre aussi un meilleur contrôle latéral de l'avion et un meilleur temps de détection du trafic que l'affichage tunnel avec fort contraste (bénéfice de 4 secondes). Ces résultats, en accord avec ceux de (Wickens, Alexander, Horrey, et al., 2004), indiquent que la présence du tunnel à l'écran permet au pilote de mieux anticiper le parcours à suivre que l'indicateur ponctuel du FMA, bien que le tunnel « encombre » plus l'écran en occupant une plus grande surface (Fadden, Ververs, & Wickens, 2001).

Les travaux récents sur l'encombrement visuel de l'affichage tête haute, menés par l'équipe du professeur David Kaber, sont riches d'enseignement sur l'effet de l'encombrement sur le contrôle de l'avion. S'inscrivant dans un programme de recherche de trois ans sur l'encombrement des écrans d'avion mené en collaboration avec la NASA, ces travaux montrent qu'il existe un compromis entre l'ajout d'informations pertinentes à l'écran et l'augmentation de l'encombrement visuel qui en résulte.

Dans une première étude, Alexander et ses collègues (Alexander et al., 2012, 2009) ont défini trois niveaux d'encombrement d'un affichage tête haute (faible, modéré, élevé) en ajoutant de l'information pertinente au pilote mais occupant plus d'espace à l'écran. Ces sources d'information sont la symbologie primaire, le tunnel, la vision synthétique¹⁸ et la vision améliorée¹⁹. L'écran ayant un encombrement faible n'a que la symbologie primaire affichée, alors que l'écran ayant un encombrement élevé présente toutes les fonctions (primaire, tunnel, synthétique et améliorée). Alexander et ses collègues ont demandé à six pilotes experts, ayant plus de 15 ans d'expérience, de voler pendant une phase d'approche dans une condition de charge de travail faible (sans vent) et élevée (vent de travers). Les auteurs ont trouvé un meilleur contrôle de la déviation verticale (*glideslope*, $p = 0.07$) et horizontale (*localizer*, $p < 0.01$) pour l'affichage avec un encombrement modéré comparativement à un encombrement faible. L'effet du vent sur le contrôle de l'avion n'est pas significatif. De plus, la charge de travail mentale des pilotes, mesurée avec le NASA-TLX, est plus faible pour l'affichage avec un niveau modéré d'encombrement que pour les affichages avec un encombrement faible ou élevé ($p < 0.05$). Les auteurs expliquent que l'écran ayant un encombrement faible manque d'informations pertinentes pour le contrôle et l'anticipation du comportement de l'avion, alors que l'écran ayant un encombrement élevé présente de l'information redondante et a une densité élevée. Ces résultats

¹⁸ Le système de vision synthétique (*Synthetic vision system, SVS*) est une reproduction 3D à l'écran du terrain au voisinage de l'avion. Le système utilise une base de données topographiques embarquée dans l'avion et la coordonnée actuelle de l'appareil pour recréer un affichage en perspective égocentrique sur un affichage tête haute ou tête basse.

¹⁹ Le système de vision améliorée (*Enhanced vision system, EVS*) présente une vue instantanée à l'extérieur de l'avion, capable de percer le couvert nuageux et la faible luminosité. Le système utilise un capteur installé à l'avant de l'avion (p. ex. une caméra infrarouge).

sont intéressants pour trois raisons. D'abord, ils présentent un *gradient* de trois niveaux d'encombrement de l'affichage, alors que les études précédentes se limitent à deux niveaux (encombré, non encombré). Puis, ils montrent l'avantage pour la performance d'un affichage ayant un niveau *modéré* d'encombrement, soit un compromis entre l'ajout d'informations pertinentes pour le pilote et l'augmentation du poids visuel de l'affichage. Finalement, ces résultats montrent que l'encombrement de l'affichage affecte significativement la performance d'opérateurs *experts* ayant plusieurs années d'expérience de vol. Les limitations de cette étude sont le nombre restreint de participants et le fait de n'avoir recruté que des pilotes experts, limitant la généralisation des conclusions.

La seconde étude du groupe de recherche (Kim et al., 2011; Naylor, 2010) reproduit la même procédure expérimentale, mais cette fois avec 18 pilotes divisés en trois groupes selon leur expérience de vol (faible, moyenne, élevée). Les résultats obtenus par (Kim et al., 2011; Naylor, 2010) sont semblables à ceux de (Alexander et al., 2012, 2009), soit que l'écran avec un encombrement modéré offre un meilleur contrôle de la déviation verticale ($p < 0.05$) et latérale ($p < 0.001$) que les écrans avec un encombrement faible ou élevé. De plus, les pilotes rapportent une charge de travail mentale accrue pour les écrans avec un encombrement faible et élevé, comparativement à l'écran avec un encombrement modéré ($p = 0.001$). Kim et ses collègues (2011) ont aussi trouvé que les pilotes expérimentés sont plus sensibles et cohérents dans leur jugement du niveau d'encombrement d'un écran que les pilotes avec moins d'expérience. Ceci suggère que les pilotes expérimentés sont plus aptes à juger quels éléments de l'affichage sont pertinents pour le scénario de vol et lesquels obstruent l'écran.


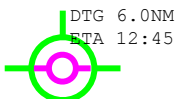

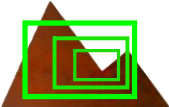
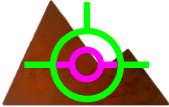
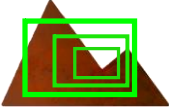
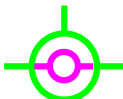
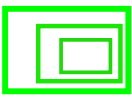
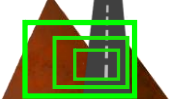

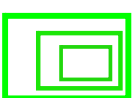
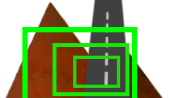




Globalement, les résultats expérimentaux de l'équipe du professeur Kaber montrent qu'il existe un optimum d'encombrement visuel en terme de performance technique de vol (Alexander et al., 2012, 2009; Kim et al., 2011; Naylor, 2010). Un écran ayant un encombrement faible manque des informations de contexte utilisées pour anticiper le comportement de l'avion. Au contraire, un écran ayant beaucoup d'informations est visuellement chargé et complexifie le parcours visuel du pilote pour la recherche des groupes d'informations nécessaires pour la tâche.

2.4.2.1 Synthèse

Le Tableau 2.4 présente les principaux résultats des études revues dans cette section. Ces études montrent un effet mixte de l'encombrement visuel sur la performance du contrôle de l'avion. Une

étude n'a trouvé aucun effet significatif de l'encombrement sur l'erreur technique de vol (Ververs & Wickens, 1998). Deux études ont trouvé que l'écran ayant un encombrement visuel élevé offre un meilleur contrôle de l'avion que l'écran ayant un encombrement faible (Alexander et al., 2005; Wickens, Alexander, Horrey, et al., 2004). Les études du groupe de Kaber et ses collègues ont trouvé que l'affichage tête haute ayant un encombrement modéré offre le meilleur contrôle de l'avion et une charge de travail mentale inférieure aux écrans ayant un encombrement faible ou élevé (Alexander et al., 2012, 2009; Kim et al., 2011; Naylor, 2010).

Tableau 2.4 Effet de l'encombement visuel sur la performance du contrôle de l'avion.
Tableau adapté de (Doyon-Poulin et al., 2012)

<i>Étude</i>	<i>Fonctions sur l'affichage avec un niveau d'encombement</i>			<i>Meilleure performance</i>	
	<i>Faible</i>	<i>Modéré</i>	<i>Élevé</i>	<i>Vol</i>	<i>Détection</i>
(Ververs & Wickens, 1996, 1998)		-		Non significatif	Encombement faible
(Wickens, Alexander, Horrey, et al., 2004)		-		Encombement élevé	Encombement faible
(Alexander et al., 2005)		-		Encombement élevé	Encombement faible
(Alexander et al., 2012, 2009)				Encombement modéré	-
(Kim et al., 2011; Naylor, 2010)				Encombement modéré	-
Légende	 FPV + FD	DTG 6.0NM ETA 12:45 Libellé	 Tunnel	 Vision synthétique	 Vision améliorée

Nous proposons quatre explications pour interpréter ces résultats et mieux comprendre l'effet de l'encombement visuel sur la tâche de pilotage. Premièrement, le pilote utilise d'autres indices pour contrôler l'avion que simplement les symboles affichés sur le PFD. Par exemple, le pilote se fie aux mouvements de l'avion, perçus par le système proprioceptif, pour sentir le comportement de l'appareil; le son variable des moteurs sert aussi d'indication d'un changement de régime de l'appareil. Ces informations ne sont pas affectées par l'encombement visuel de l'affichage.

Deuxièmement, le pilote est un expert dans sa tâche, ayant parfois volé plusieurs milliers d'heures, et qui a complété une formation extensive. En ce sens, il emploie des stratégies de reconnaissance de formes (*pattern matching*) pour réaliser son travail. Un écran qui inhibe les mécanismes de reconnaissance de formes peut décroître la performance de vol, bien que celui-ci soit moins encombré. Cette explication est reflétée dans les observations de Kim et ses collègues (2011) et de Naylor (2010) : les pilotes rapportent que l'écran ayant un niveau d'encombrement faible n'offre pas les informations en périphérie nécessaires pour anticiper les manœuvres de l'avion. Ceci perturbe le parcours visuel du pilote, car ce dernier doit balayer une plus grande portion de l'écran pour trouver les groupes d'informations requis pour compléter l'atterrissage.

Troisièmement, la performance du pilote pour la tâche de contrôle de l'avion est moins sensible à l'effet de l'encombrement visuel que pour la tâche de prospection visuelle. Pour comprendre cette explication, il suffit de retourner aux deux tableaux synthèses. Les résultats regroupés dans le Tableau 2.3 montrent clairement que la tâche de prospection visuelle est très sensible au niveau d'encombrement visuel : le temps de recherche est proportionnel au niveau d'encombrement. Toutefois, les résultats pour la tâche de contrôle de l'avion présentés au Tableau 2.4 sont mixtes.

Le travail de Horrey et Wickens (2004) est utile pour comprendre la dépendance à la tâche de l'encombrement visuel. Dans une tâche de conduite automobile, les auteurs n'ont pas trouvé de différence significative dans le contrôle de la position et de la vitesse du véhicule pour l'information affichée dans la condition « encombrée » et dans la condition « désencombrée » (Horrey & Wickens, 2004). Les auteurs ont présenté aux participants la même information – un numéro de téléphone – dans quatre conditions : sur le pare-brise du véhicule superposée au champ de vision (*overlay*, condition encombrée), directement au-dessus du tableau de bord du véhicule mais hors du champ de vision (*adjacent*, condition désencombrée), sur la console du véhicule (écran tête basse) et de manière auditive. Les auteurs expliquent leurs résultats par le fait que les tâches impliquant une *vision ambiante* – c'est-à-dire une tâche utilisant des indices en vision périphérique de déplacement égocentrique dans l'espace, comme la conduite automobile –, semblent insensibles à l'encombrement du champ de vision, alors que les tâches nécessitant une *vision focale* – c'est-à-dire une tâche utilisant la vision fovéale comme la prospection visuelle, l'identification de cibles ou la lecture – voient leur performance diminuer avec l'encombrement. Ce constat est important et mérite d'être répété : *l'effet de l'encombrement visuel sur la performance dépend de la tâche.*

La quatrième explication que nous présentons pour expliquer ces résultats est que les études précédentes n'ont pas manipulé la variable d'encombrement visuel de façon similaire (Doyon-Poulin et al., 2012). Dans (Ververs & Wickens, 1998) tant l'écran ayant un encombrement faible que celui élevé présentent l'information primaire pour voler. Toutefois, dans (Alexander et al., 2005; Wickens, Alexander, Horrey, et al., 2004) les auteurs ont comparé l'avantage de l'affichage tunnel comme fonction de guidage par rapport au directeur de vol. Ces deux fonctions présentent une information d'une nature différente : le tunnel présente le couloir aérien et aide le pilote à anticiper les prochaines commandes de vol (Fadden et al., 2001). Le directeur de vol manque une telle information d'anticipation. Les études de (Alexander et al., 2012, 2009; Kim et al., 2011; Naylor, 2010) ont aussi modifié la fonction de guidage en présentant l'affichage tunnel pour les écrans avec un niveau d'encombrement modéré et élevé, mais qui est absent de l'écran avec un niveau d'encombrement faible. Comme il a été présenté au chapitre précédent, plusieurs études ont montré que l'affichage tunnel offre une meilleure conscience de la situation (Dorighi et al., 1991; Parrish et al., 1994) et une meilleure performance technique de vol (Bailey et al., 2006; Prinzl III et al., 2004; Prinzl et al., 2004).

Ainsi, le gain en performance trouvé pour les affichages ayant un encombrement élevé peut être dû au bénéfice intrinsèque de la fonction de guidage tunnel plutôt qu'à l'encombrement visuel. Nous avançons que comparer le niveau d'encombrement visuel de symbolologies radicalement différentes, comme c'est le cas des expériences comparant le tunnel au directeur de vol, ne tient pas compte du fait qu'un affichage visuellement chargé peut offrir des fonctions utiles à l'utilisateur qui sont absentes d'un affichage désencombré.

2.4.3 Nouvelles exigences pour la manipulation de l'encombrement

Ce dernier constat nous renvoie à un nouveau problème pour la recherche sur l'encombrement visuel : comment assurer que les expérimentateurs manipulent le niveau d'encombrement visuel de manière similaire entre les affichages de leurs études? Si ce n'est pas le cas, alors les résultats de ces dernières ne s'appliquent pas uniquement à l'effet de l'encombrement visuel, mais à l'effet d'autres facteurs.

Afin de s'assurer que la variable d'encombrement visuel soit contrôlée de façon similaire entre les affichages d'une expérience, et que les affichages présentent des informations de même

nature, nous proposons trois exigences que tous les affichages devraient respecter (Doyon-Poulin et al., 2012) :

1. Présenter l'information minimale nécessaire pour réaliser la tâche;
2. Présenter une structure de l'information similaire et compatible avec la tâche;
3. Offrir le même ensemble de fonctions à l'utilisateur.

Selon la première exigence, l'affichage doit supporter la tâche pour laquelle il a été conçu, en présentant l'information et les fonctions nécessaires pour réaliser la tâche. Cela signifie que l'information essentielle à la tâche est présente sur tous les affichages. Autrement, l'affichage ayant un encombrement faible manque l'information pertinente pour la tâche, influençant ainsi la performance du pilote. Il serait alors difficile de discerner si la baisse de performance provient du niveau d'encombrement de l'écran ou de l'absence d'information utile.

Selon la seconde exigence, l'organisation de l'information présentée doit être compatible avec la structure de la tâche. Cela signifie que les affichages testés doivent avoir une hiérarchie de menus et un groupement de fonctions similaires. Sinon, l'expérience modifie l'utilisabilité de l'application et peut masquer les effets de la variable d'encombrement visuel.

Selon la troisième exigence, les affichages doivent présenter les mêmes fonctions ou groupes de fonctions au pilote. Autrement, l'expérimentateur peut concevoir un affichage ayant plusieurs fonctions utiles à la tâche du pilote, et conclure que l'écran visuellement chargé offre un gain en performance sur l'écran avec un encombrement minimal. Toutefois, l'utilisateur peut accéder à plus d'information et compléter plus d'actions avec le premier écran que le second. Dans cette situation, décrire les deux écrans comme ayant un niveau d'encombrement différent est inapproprié, car ce n'est pas tant l'encombrement que l'ajout de nouvelles fonctions qui améliore la performance.

Ces trois exigences restreignent l'étude de l'encombrement visuel à des affichages ayant une même symbologie. Par exemple, une expérience étudiant les effets de l'encombrement visuel d'un écran SVS peut manipuler le niveau d'encombrement en affichant le terrain avec (a) une grille, (b) une texture synthétique, ou (c) une texture photo-réaliste (voir Figure 2.2) (Bolton & Bass, 2009). Ces trois textures de terrain offrent une information de vol similaire et supporte la même conscience minimale de l'environnement voisin. Toutefois, une expérience comparant un

SVS photo-réaliste avec un indicateur d'horizon artificiel traditionnel explore les avantages du concept d'affichage SVS. Il est peu pertinent de comparer le niveau d'encombrement visuel des deux affichages car le SVS offre une information radicalement différente de celle du panneau d'instruments.



Figure 2.2 Trois représentations de terrain pour un écran SVS respectant les trois exigences de manipulation de l'encombrement.

Une limitation dans l'implémentation de ces exigences est qu'il est difficile de savoir à l'avance l'information nécessaire à la tâche ou la structure d'information appropriée. Il est important de réaliser que ces exigences n'imposent pas de présenter *toute* l'information nécessaire à la tâche, mais bien que tous les écrans présentent la *même* information de base. Ceci est pour éviter le problème identifié dans les études passées où la manipulation de l'encombrement visuel altère aussi l'information affichée au pilote.

Une seconde limitation est le lien entre l'ajout de fonctions et l'augmentation de l'encombrement visuel. Un logiciel ajoutant de nouvelles fonctions verra son interface graphique plus chargée, car de nouveaux boutons ou libellés doivent supporter les fonctions. Un test d'utilisabilité des nouvelles fonctions entre les deux versions du logiciel risque de trouver un gain en performance pour la version modifiée, car celle-ci offre un accès direct à ces fonctions malgré une charge visuelle plus grande. Dans ce cas, c'est la disponibilité des nouvelles fonctions et non pas l'encombrement visuel qui est responsable du gain en performance. Une conception radicalement différente de l'interface graphique, p. ex. un changement de l'esthétique de l'interface, pourrait réduire la complexité visuelle tout en offrant les nouvelles fonctions (Thomas & Richards, 2008).

Ces exigences établissent une procédure pour tester l'effet de l'encombrement visuel. L'expérimentateur doit d'abord définir l'ensemble minimal d'information nécessaire pour compléter le scénario de vol. Cette information de base doit être présentée sur tous les affichages.

Puis, l'expérimentateur augmente le niveau d'encombrement visuel en ajoutant des groupes d'informations redondants ou des symboles à l'écran. La section sur les contributeurs de l'encombrement peut aider à cette étape. La même procédure est respectée pour la structure de l'information et les fonctions disponibles à l'utilisateur.

2.5 Synthèse

La revue de littérature a permis de réaliser plusieurs contributions utiles pour la suite de cette thèse. Premièrement, nous avons proposé une nouvelle définition de l'encombrement visuel qui fait la synthèse des définitions existantes en plus d'ajouter la dimension de contexte de la tâche. Deuxièmement, nous avons identifié les éléments contribuant à augmenter l'encombrement visuel d'un affichage. Ces éléments seront utiles lorsque viendra le temps de concevoir les affichages pour notre expérience. Troisièmement, nous avons comparé les métriques d'encombrement existantes dans la littérature et nous avons identifié trois métriques pertinentes pour ce travail : une métrique d'analyse d'image (*feature congestion*), un questionnaire (*Clutter rating scale*) et une métrique d'oculométrie. Quatrièmement, nous avons montré que l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de l'utilisateur dépend de la tâche réalisée. Les études passées sur la tâche de pilotage d'avion montrent un effet mixte, car la variable d'encombrement visuel n'a pas été manipulée de manière similaire entre les études. Cinquièmement, nous avons proposé trois exigences que tous les affichages utilisés pour une expérience sur l'encombrement visuel devraient respecter afin d'assurer que la variable d'encombrement visuel soit manipulée de manière similaire. Nous respecterons ces exigences lorsque viendra le temps de concevoir les affichages pour notre expérience.

CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

3.1 Problématique

Les études passées en psychologie de la perception montrent un effet clair de l'encombrement visuel sur la performance de la tâche de prospection visuelle. Les études passées en aviation montrent un effet mixte de l'encombrement visuel sur la performance de la tâche de vol de l'avion. Nous avons expliqué cette différence par le fait que les études passées en aviation ont manipulé la fonction de guidage en plus de changer le niveau d'encombrement visuel de l'affichage. Il existe donc un besoin pour une étude expérimentale formelle manipulant uniquement la variable d'encombrement visuel de l'écran primaire de vol afin d'observer son effet sur la performance du pilote à effectuer une tâche complexe, dynamique et continue, soit le vol d'avion.

Il existe aussi un besoin pour étudier l'effet de l'encombrement visuel sur l'allocation de l'attention d'un participant expert durant une tâche complexe, dynamique et continue comme le contrôle de l'avion. Il existe une seule étude ayant mesuré le parcours visuel de pilotes (Moacdieh, Prinnet, & Sarter, 2013), mais elle n'a pas contrôlé la fonction de guidage des affichages. L'analyse du parcours visuel des participants, enregistré à l'aide d'un oculomètre (*eye tracker*), offre de nouveaux résultats à notre étude qui la distingue des études précédentes.

Finalement, il existe aussi un besoin d'étudier plus de deux niveaux d'encombrement de l'écran primaire de vol afin de comprendre la relation (linéaire ou autre) entre le niveau d'encombrement et la performance du participant. Ceci permettra de mieux comprendre – voire de remettre en question – l'exigence des autorités réglementaire de minimiser l'encombrement visuel à l'écran. Ce point distingue cette étude des précédentes qui n'ont testé que deux niveaux d'encombrement (faible ou élevé) et permettrait d'identifier un niveau optimal d'encombrement visuel pour une tâche réelle et complexe en termes de performance de l'opérateur.

3.2 Objectifs

Sur le plan théorique, l'objectif de cette thèse est de faire avancer les connaissances en termes de résultats expérimentaux sur les causes de l'encombrement visuel d'un affichage et ses effets sur la performance humaine dans une tâche dynamique de pilotage.

Sur le plan pratique, l'objectif de cette thèse est d'aider les concepteurs d'interfaces graphiques en leur permettant de prendre de meilleures décisions de conception sur le niveau d'encombrement visuel optimal de l'affichage à l'aide de lignes directrices, et de présenter une méthode d'évaluation de l'encombrement visuel d'un affichage en situation dynamique avec des utilisateurs experts.

3.3 Choix stratégique

Le choix stratégique réalisé dans cette thèse est d'opter pour une approche expérimentale en simulateur de vol. Pour ce faire, nous avons développé trois écrans primaire de vol, chacun avec un niveau d'encombrement visuel différent : faible, modéré, élevé. Un groupe de pilotes utilisent chacun des écrans afin de compléter un vol en phase d'approche. Leur performance technique de vol, le parcours du regard à l'écran, de même que leur perception subjective des écrans en termes d'encombrement, d'esthétique et de charge de travail sont enregistrés.

L'approche expérimentale que nous utilisons offre trois avantages pour l'envergure de cette thèse. Premièrement, nous avons manipulé la variable du niveau d'encombrement visuel des affichages sans modifier les autres variables (c.-à-d. information primaire, fonction, organisation). Nous avons montré au chapitre précédent que le contrôle de la variable d'encombrement n'a pas été fait de manière similaire dans les études passées. Dans cette expérience, nous avons utilisé le modèle à trois dimensions de l'encombrement et les trois exigences pour la conception d'écran, que nous avons formulées au chapitre précédent, afin de concevoir trois affichages expérimentaux qui respectent ces exigences. Ces nouvelles règles de conception des affichages offre un cadre rigoureux pour l'étude de l'encombrement visuel qui distingue cette étude des précédentes.

Deuxièmement, la portée des résultats obtenus dans cette expérience s'applique directement au domaine d'étude de cette thèse, soit la conception d'écran pour le poste de pilotage. La tâche demandée aux pilotes est une tâche réelle de vol aux instruments. Les enseignements tirés sur les effets de l'encombrement sur la performance serviront les concepteurs d'écrans et les autorités de réglementation aériennes.

Troisièmement, cette expérience utilise un système d'oculométrie (*eye tracker*) pour enregistrer le parcours visuel du pilote à l'écran. Cette mesure permet de connaître de manière précise l'effet

de l'encombrement de l'écran sur l'allocation de l'attention du pilote, une mesure absente des études précédentes.

3.4 Hypothèses

Cette étude a testé l'impact de trois niveaux d'encombrement visuel de l'écran primaire de vol (faible, modéré et élevé) sur la performance des pilotes. Nous prévoyons que la perception des participants du niveau d'encombrement visuel des écrans après leur utilisation, tel que mesuré par le questionnaire d'évaluation de l'encombrement visuel, suive le classement établi au moment de la conception des écrans. Il s'agit là de notre première hypothèse.

H1 : L'évaluation par les participants du niveau d'encombrement visuel de l'écran correspond au niveau d'encombrement de l'écran que nous avons conçu.

L'intérêt de l'étude de l'encombrement visuel est qu'il affecte la performance de l'utilisateur. Les résultats des études précédentes ont montré un effet mixte de l'encombrement visuel de l'écran sur la performance technique de vol, mesurée par la déviation latérale et verticale de l'appareil. En respectant les exigences de conception formulées précédemment pour l'étude de l'encombrement visuel, nous prévoyons observer un effet de l'encombrement visuel sur la performance de vol, et nous prévoyons que cet effet sera négatif pour l'écran encombré.

H2 : La performance technique de vol diminue pour l'écran ayant un encombrement élevé comparativement aux écrans ayant un encombrement faible ou modéré.

Nous prévoyons que l'augmentation de l'encombrement visuel affecte aussi la performance subjective, soit la charge mentale de travail mesurée par le questionnaire NASA-TLX. Les participants utilisant l'écran avec un niveau d'encombrement visuel élevé doivent filtrer l'instrumentation inutile afin de concentrer leur attention sur les instruments pertinents. Au contraire, l'écran ayant un niveau d'encombrement faible demande un plus grand effort de travail mental car le pilote doit mémoriser la valeur des paramètres à atteindre (p. ex. cap de la piste, vitesse d'approche, etc.). Conséquemment, la troisième hypothèse prévoit une charge mentale de travail inférieure pour l'écran avec un niveau d'encombrement modéré.

H3 : La charge de travail perçue diminue pour l'écran ayant un encombrement modéré comparativement aux écrans ayant un encombrement faible et élevé.

La surabondance d'information de l'écran avec un niveau d'encombrement visuel élevé risque de perturber le parcours visuel du pilote, nécessitant de balayer une plus grande superficie de l'écran pour acquérir l'information pertinente pour la tâche de vol. La disposition des instruments et l'ergonomie des interfaces avec un niveau d'encombrement faible et modéré étant semblables, nous prévoyons un parcours visuel similaire pour ces deux écrans. Par conséquent, nous prévoyons que l'effet de l'encombrement visuel sur l'efficacité du parcours visuel, tel que mesurée par le nombre total de fixations, la longueur moyenne d'une fixation et le temps de fixation cumulé sur les indicateurs de déviation, se fera au détriment de l'écran ayant un niveau d'encombrement élevé.

H4 : L'efficacité du parcours visuel du pilote diminue pour l'écran ayant un niveau d'encombrement élevé comparativement aux écrans ayant un niveau d'encombrement faible et modéré.

Les variables dépendantes mesurées dans cette étude reflètent les quatre hypothèses de cette étude. Celles-ci sont présentées en détail au chapitre suivant sur la méthode expérimentale employée pour notre étude.

CHAPITRE 4 CONCEPTION DES AFFICHAGES

Dans ce chapitre, nous présentons le cycle de conception des affichages de vol utilisés dans cette étude. Le chapitre débute en présentant les exigences d'information que les affichages doivent respecter, puis présente une grille de facteurs graphiques à considérer pour varier l'encombrement visuel d'un affichage. Cette grille a été conçue à l'aide des facteurs identifiés au chapitre de revue de la littérature. Ensuite, le chapitre présente une revue des affichages de vol existants qui a permis d'établir l'étendue du niveau d'encombrement réalisable dans cette étude. Les affichages conçus pour cette étude y sont ensuite présentés. Le chapitre se termine par une analyse du niveau d'encombrement des affichages conçus à l'aide des métriques automatisées.

4.1 Exigences d'information et d'organisation des affichages

Dans le chapitre de revue de littérature, nous avons identifié que les études précédentes sur l'encombrement visuel n'ont pas manipulé la variable d'encombrement visuel de manière semblable. Pour éviter que notre étude ne fasse l'objet de cette limitation, nous avons établi des exigences en termes d'encombrement visuel, de besoin d'information et de représentation graphique que doivent respecter les affichages conçus pour cette étude.

À la fin du chapitre de revue de la littérature, nous avons proposé trois critères à conserver constants entre les conditions pour la manipulation de l'encombrement (Doyon-Poulin et al., 2012) : l'écran doit présenter au moins l'information minimal requise pour compléter la tâche; l'utilisabilité de l'écran est la même entre les conditions; l'écran offre le même ensemble de fonctions à l'utilisateur. Dans cette expérience, nous respectons ces trois critères pour les trois écrans testés.

Pour ce faire, nous avons défini l'information minimale requise pour la tâche²⁰ avec l'aide d'un pilote expert de la tâche (*subject matter expert, SME*). Il s'agit des indicateurs de déviations verticale et latérale, de vitesse, d'altitude, de cap et de l'horizon artificiel. Cette information est présente sur tous les écrans. De même, la disposition des indicateurs est similaire entre les

²⁰ La tâche demandée aux pilotes est présentée à la section 5.3 Tâche et scénario de vol.

affichages et respecte la convention du T de base (p. ex., l'indicateur de vitesse est à gauche de l'horizon artificiel).

Quant aux exigences à satisfaire pour la représentation graphique, nous avons utilisé les guides de conception de symboles (SAE ARP4102-7, 1999; SAE ARP5364; SAE AIR1093; FAA AC-25-11A, 2007) et les documents de certification des écrans en aviation pour la conception des écrans. Ces documents indiquent les instruments nécessaires à l'écran pour la tâche de vol, de même que leur représentation graphique recommandée (p. ex., taille de caractères, convention des symboles dans le domaine, etc.). Ce dernier point est important: la manipulation de l'encombrement des écrans se fait dans les limites permises des symboles de l'écran de vol tels que prescrits par les guides de conception. Ceci prévient qu'un écran ne soit artificiellement encombré, ou qu'un autre manque des éléments essentiels pour le travail du pilote.

Nous avons aussi établi cinq exigences spécifiques à cette expérimentation, afin d'assurer qu'un écran ne soit pas artificiellement encombré :

- Les interfaces créées doivent être suffisamment différentes les unes des autres afin de pouvoir mesurer un niveau d'encombrement visuel différent;
- La variation de l'interface ne doit pas modifier les fonctions et l'organisation hiérarchique du PFD;
- La variation de l'interface ne doit pas être spécifique à un manufacturier;
- La variation de l'interface doit être réaliste et représentée un écran qui pourrait être utilisé dans le cockpit;
- La variation de l'interface ne doit pas modifier les exigences minimales d'information nécessaires pour la tâche.

Ces règles assurent que tous les écrans conçus les exigences minimales d'information pour la tâche du pilote et que les fonctions disponibles à l'écran sont les mêmes. Elles évitent de plus la conception d'un écran qui serait inutilisable pour le vol tant son organisation visuelle serait mal considérée.

4.2 Grille de manipulation de l'encombrement visuel

À la section 2.2, nous avons identifié plusieurs facteurs contribuant à l'encombrement visuel d'un affichage et qui sont reliés à la densité visuelle, la densité d'information et son organisation. Dans cette section, nous présentons ces facteurs dans un tableau d'éléments graphiques à utiliser pour optimiser l'encombrement visuel d'une interface (voir Tableau 4.1). Nous avons utilisé ce tableau au moment de la conception des trois affichages de vol afin d'obtenir une variation suffisante du niveau d'encombrement entre les affichages.

Tableau 4.1 Grille de manipulation de l'encombrement visuel





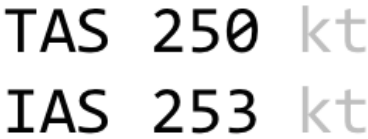
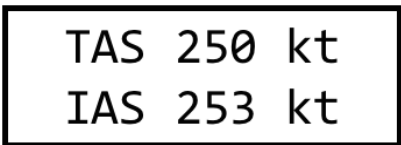


Facteur	Encombrement	
	Diminue	Augmente
<i>Densité visuelle</i>		
Couleur	 Monochrome	 Codage de couleur
Alignement	 Aligner les objets sur une grille et uniformiser la taille des objets	 Décentrer les objets et varier la taille des objets
Contraste	 Diminuer le contraste des informations secondaires	 Augmenter le contraste de tous les objets, délimiter les objets avec une bordure
Police de caractère	 Sans empattement	 Avec empattement

Tableau 4.1 Grille de manipulation de l'encombrement visuel (suite)




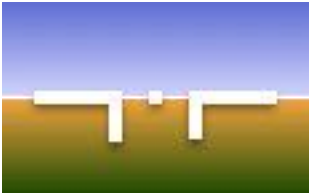






Facteur	Encombrement	
	Diminue	Augmente
<i>Esthétique</i>		
Forme	 <p>Forme simple et symétrique</p>	 <p>Forme complexe et angulaire</p>
Couleur	 <p>Monochrome</p>	 <p>Gradient de couleur et transparence</p>
<i>Densité d'information</i>		
Instrumentation	 <p>Uniquement l'information minimale</p>	 <p>Instrumentation supplémentaire, statuts des instruments</p>
Résolution	 <p>Résolution suffisante pour la tâche</p>	 <p>Résolution élevée, valeur numérique</p>
<i>Organisation</i>		
Groupes logiques	<div>TAS 221 GS 212</div> <div>DME 18.1</div> <p>Regroupement des fonctions similaires</p>	<div>TAS 221 GS 212 DME 18.1</div> <p>Réduire l'espace entre les groupes pour afficher plus d'informations</p>

Tableau 4.1 Grille de manipulation de l'encombement visuel (suite)

Facteur	Encombement	
	Diminue	Augmente
Principes de Gestalt	 Similarité en forme et en espace	 Formes complexes, espacement irrégulier

Le Tableau 4.1 présente un ensemble de facteurs qu'un concepteur peut employer pour réduire ou augmenter l'encombement visuel d'une interface. Bien qu'un effort ait été fait afin d'adapter les exemples du tableau au domaine de l'aéronautique, certains facteurs peuvent être difficiles à appliquer au moment de la conception de l'affichage, p. ex. les principes de la Gestalt. Pour identifier des applications des facteurs d'encombement tirées du domaine de l'aéronautique, et afin d'établir l'étendue du niveau d'encombement réalisable pour cette étude, nous avons réalisé une revue des PFD existants dans l'industrie aéronautique.

4.3 Revue des affichages existants et inspiration

Cette section présente les trois affichages retenus de la revue des PFD existants dans l'industrie aéronautique : l'écran tête haute, le panneau d'instruments analogiques et la vision synthétique. Ces écrans montrent une bonne étendue de densité d'information et de méthode de présentation de l'information. Cette revue a aussi servi de source d'inspiration pour la conception originale de nos affichages.

L'affichage ayant le moins de symboles et la plus faible densité d'information est l'écran tête haute (HUD). Cet écran projette les informations primaires de vol sur un verre optique permettant de superposer les symboles à la vue extérieure (voir Figure 4.1). Il présente moins d'information que les autres affichages car (1) la taille de l'écran est petite, (2) il ne faut pas que les symboles masquent la vision extérieure et (3) le pilote peut baisser la tête pour obtenir plus d'informations sur les autres affichages. On remarque que le HUD est monochrome et met en évidence les indicateurs actuels de l'appareil (peu d'information prédictive).



Figure 4.1 Écran HUD du Boeing 737-832 en approche à l'aéroport de San Francisco. Photo de Brett B. Despain, utilisée avec la permission de l'auteur (Despain, 2008).

Le panneau d'instrument du Boeing 737 est plus encombré (voir Figure 4.2). On y voit plusieurs instruments électromécaniques, avec une échelle de gradation et le lecteur numérique à tambour, entourant l'écran de l'horizon artificiel. Chaque instrument a une partition bien définie et est séparé des instruments voisins par une bordure et une couleur de fond distinctive. On remarque aussi que l'alignement des instruments sur le panneau n'est pas uniforme. Finalement, l'échelle de gradation est saillante et affiche plusieurs traits. Ces caractéristiques contribuent à augmenter l'encombrement visuel du panneau d'instruments.



Figure 4.2 Panneau d'instruments du Boeing 737 avec l'horizon artificiel au centre. Image libre de droits par Sol Young (CC-BY-2.0).

L'évolution technologique au tournant des années 2000 a offert la possibilité de présenter des représentations graphiques plus riches et colorées, et d'intégrer l'information de différents appareils de façon harmonieuse avec la tâche du pilote. Le iPFD développé par Honeywell (voir Figure 4.3) offre un exemple de la qualité graphique et de l'intégration des indicateurs à l'affichage. L'utilisation de la transparence et d'un dégradé de couleurs permet d'atténuer la séparation entre les instruments et de présenter un affichage harmonieux.



Figure 4.3 Le iPFD de Honeywell intègre l'information de différentes sources à l'écran de façon harmonieuse en effaçant la séparation entre les informations de vol (au premier plan) et le paysage (à l'arrière plan) (Honeywell, 2007).

4.4 Présentation des affichages

En respectant les exigences de conception et en utilisant la grille de manipulation de l'encombrement, nous avons conçu trois PFD ayant un niveau d'encombrement visuel faible, modéré et élevé. Les trois écrans que nous avons conçus pour cette étude sont présentés de la Figure 4.4 à la Figure 4.6, et leurs principales caractéristiques sont décrites ci-après.

La Figure 4.4 présente l'écran ayant un encombrement faible. Le PFD a une conception simple et monochrome, affichant la valeur numérique actuelle des principaux indicateurs de vol. Cet affichage ressemble à un affichage tête haute par son économie de symboles, de couleurs et d'information. Les indicateurs de déviations latérale et verticale sont les seuls instruments à afficher de la couleur, afin d'augmenter leur saillance à l'écran.

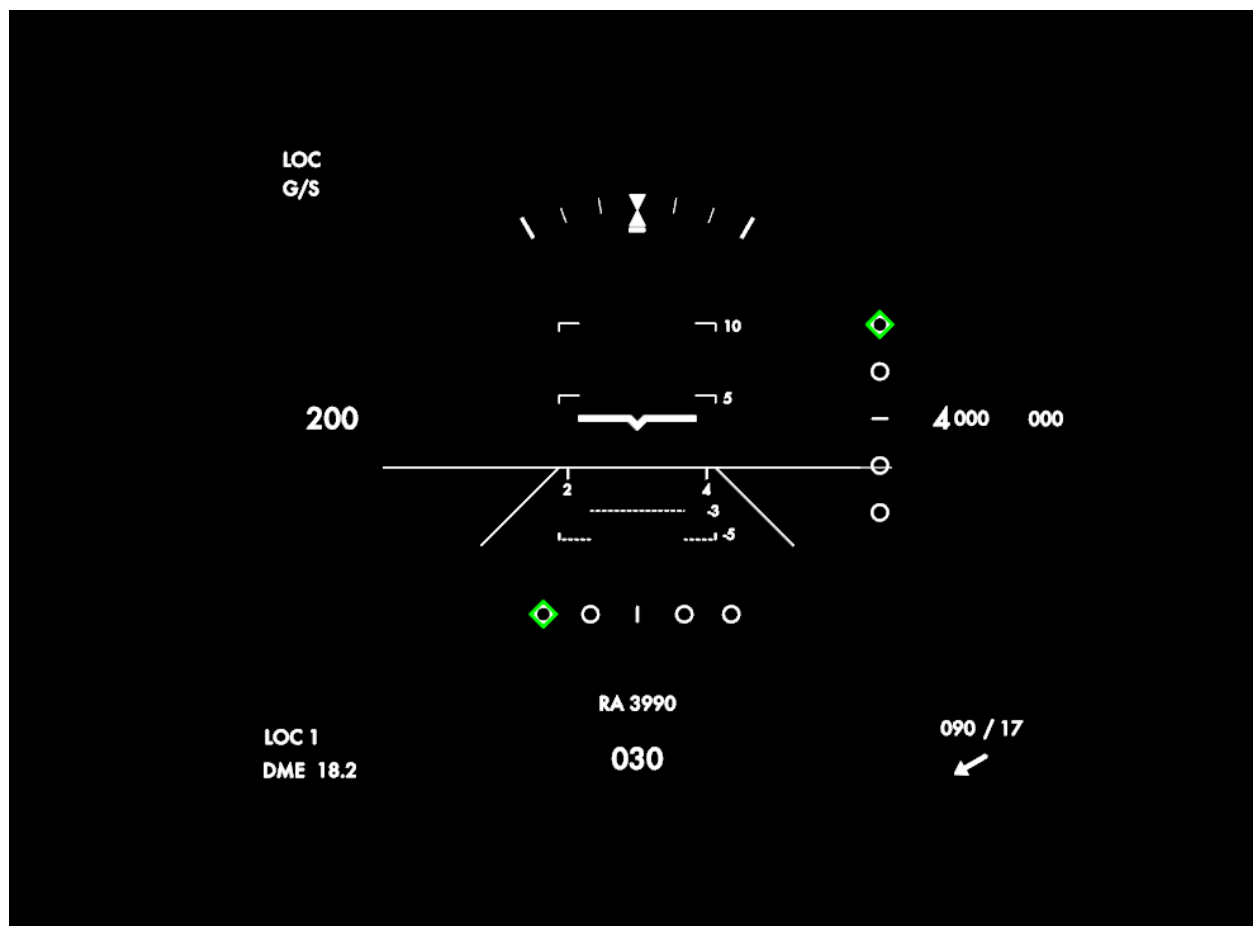


Figure 4.4 Écran PFD ayant un encombrement faible

La Figure 4.5 présente l'écran ayant un encombrement modéré. Il s'agit d'un horizon artificiel plein écran utilisant un dégradé de couleur pour le brun du sol et le bleu du ciel, de même qu'un effet de transparence pour l'arrière-plan des instruments. Comparativement à l'écran ayant un encombrement faible, l'écran ayant un encombrement modéré a un compas au bas de l'écran, une échelle d'angle de tangage avec plus de lignes, une échelle de vitesse et d'altitude avec des graduations et des sélecteurs de vitesse, d'altitude et de cap (en bleu cyan).



Figure 4.5 Écran PFD ayant un encombrement modéré.

La Figure 4.6 présente l'écran ayant un encombrement élevé. Celui-ci possède un panneau d'instrumentation à fin d'ingénierie, à gauche de l'écran, qu'un utilisateur expert peut utiliser afin d'optimiser son approche, bien que ces instruments ne soient pas nécessaires pour réaliser la tâche (p. ex., angle d'attaque, accélération verticale, etc.). Les instruments principaux ont un lecteur supplémentaire de leur valeur numérique (p. ex., indicateur de roulis). L'écran a une faible organisation visuelle de l'information et utilise une variété de symboles et de couleurs pour les instruments. Tous les instruments ont une bordure blanche saillante et une échelle avec une graduation marquée, et certains instruments ont une forme géométrique complexe comme le lecteur de vitesse. L'écran encombré utilise une police de caractère avec empattement.

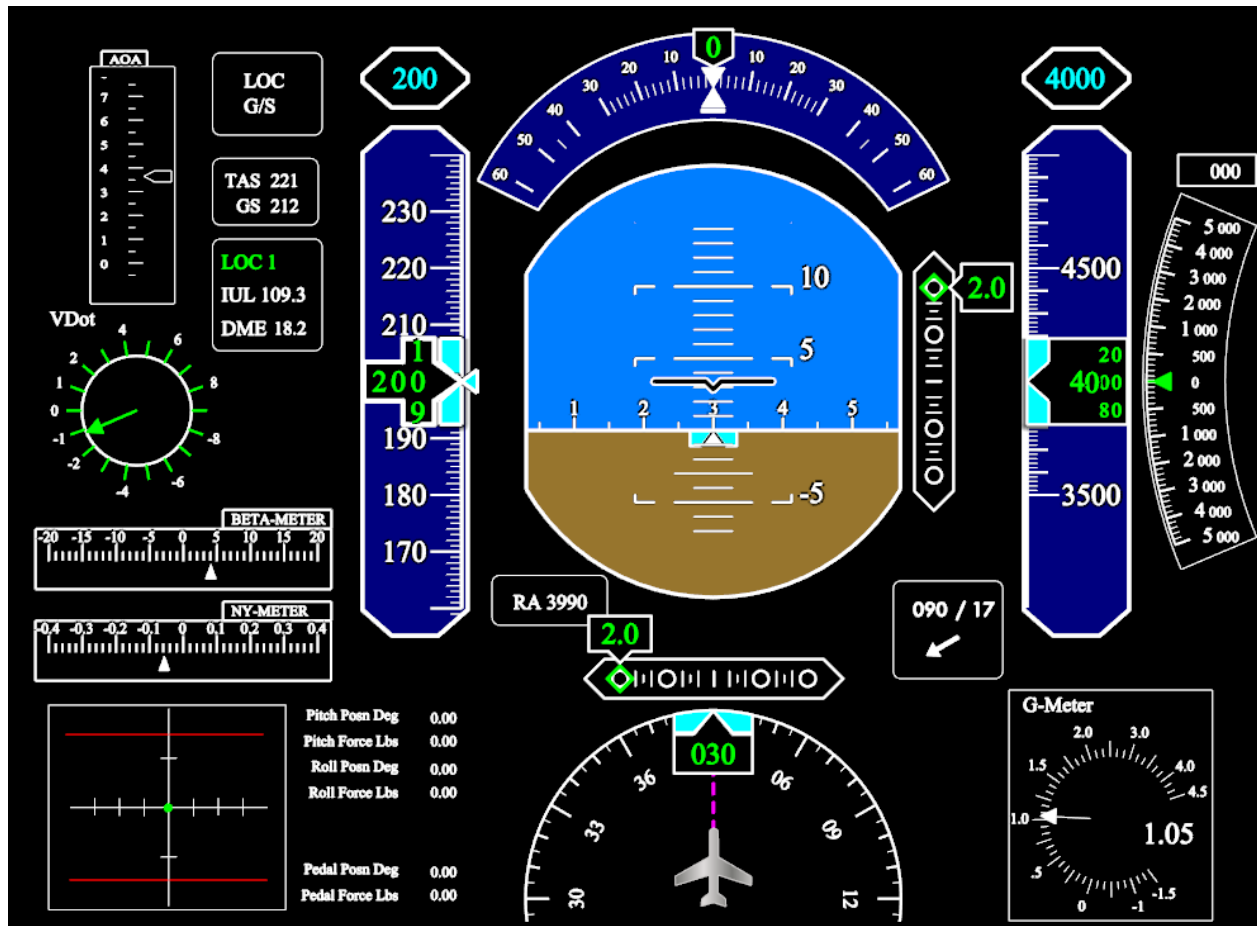


Figure 4.6 Écran PFD ayant un encombrement élevé.

Il est important de noter que les trois écrans (a) présentent au moins l'information minimale nécessaire pour réaliser la tâche, soit les paramètres primaires de vol, (b) utilisent des fonctions similaires, soit le guidage de vol à l'aide des instruments de déviation verticale et latérale, et (c) sont conçus de façon à avoir une organisation de l'information similaire et compatible avec la tâche, les instruments étant disposés autour de l'horizon artificiel.

Les trois écrans ont un encombrement visuel différent et respectent les trois exigences que nous avons proposées au chapitre 2 pour l'étude de l'encombrement visuel. Le respect de la méthodologie avancée au chapitre 2 procure une assurance que notre étude a manipulé le niveau d'encombrement visuel des écrans en laissant inchangés les facteurs d'information, de fonction et de structure.

4.5 Analyse des affichages

Afin de valider les niveaux d'encombrement visuel des trois affichages développés, nous les avons analysés avec l'algorithme *Feature Congestion* (Rosenholtz et al., 2005, 2007). Tel que présenté à la section 2.3.1, cet algorithme analyse la variabilité locale des attributs de couleur, luminosité et orientation de l'interface. L'algorithme offre deux extrants, soit une métrique scalaire de l'encombrement global de l'interface et une carte de visualisation indiquant les régions contribuant le plus à l'encombrement.

Deux limitations de cet algorithme sont qu'il utilise une unité arbitraire pour la métrique d'encombrement et qu'il n'existe pas d'échelle pour comparer les métriques de différents affichages. Comme dans les travaux de (Rosenholtz et al., 2005, 2007), nous avons décidé de présenter les métriques avec leur unité d'origine et de normaliser les cartes de visualisation en fonction de l'affichage le plus encombré des trois. Ces choix permettent de comparer les trois affichages en utilisant un dénominateur commun.

4.5.1 Métrique d'encombrement global

La Figure 4.7 présente la métrique d'encombrement global mesurée par *Feature Congestion* pour les trois affichages. Le résultat obtenu par l'algorithme suit le classement du niveau d'encombrement des affichages au moment de la conception : le PFD ayant un encombrement faible a un résultat de 2.12, soit le plus faible des trois, suivi du PFD ayant un encombrement modéré avec un résultat de 3.20 et du PFD ayant un encombrement élevé avec un résultat de 7.58. L'amplitude du résultat du PFD ayant un encombrement élevé est importante, car elle est plus du double du résultat du PFD ayant un encombrement modéré. La Figure 4.7 montre clairement un taux de variation plus important entre les écrans ayant un encombrement modéré et élevé que celui entre les écrans ayant un encombrement faible et modéré.

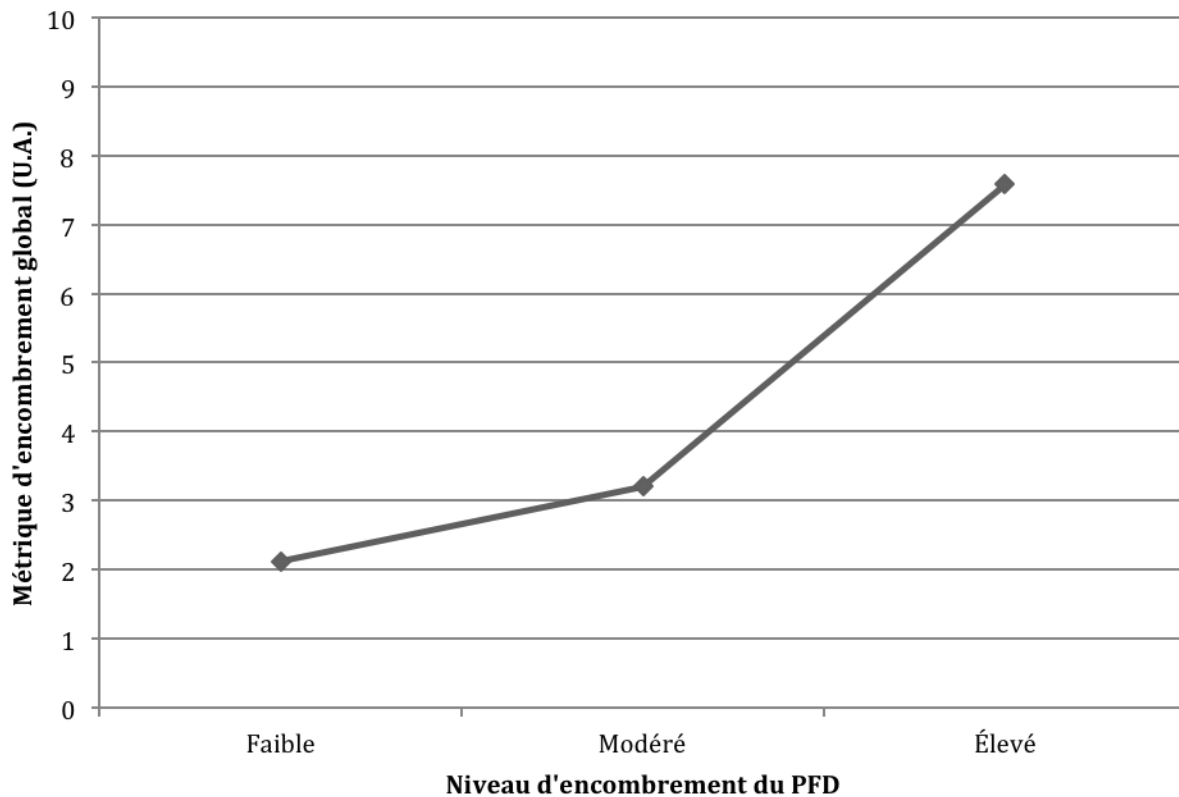


Figure 4.7 Métrique d'encombrement global mesurée par *Feature Congestion*.

4.5.2 Carte d'encombrement

L'algorithme *Feature Congestion* offre aussi en extrant une carte de visualisation de l'encombrement global. Pour obtenir la carte d'encombrement global, l'algorithme utilise l'image de l'interface reçue en intrant et construit trois cartes intermédiaires d'encombrement, soit une carte pour chacun des attributs visuels de couleur, contraste et orientation. Ces cartes intermédiaires représentent le niveau de variation locale de chacun des attributs visuels, calculé par l'application de filtres gaussien passe-bas. L'attribut de couleur décompose l'image reçue en intrant selon les trois couleurs primaires rouge, vert et bleu. L'attribut de contraste convertit l'image reçue en intrant en niveaux de gris et analyse sa luminosité. L'attribut d'orientation filtre l'image reçue en intrant pour identifier la présence de traits avec un angle de 0° (horizontal), 30° , 45° , 60° et 90° (vertical). Ensuite, l'algorithme normalise les trois cartes intermédiaires afin qu'elles aient une pondération similaire et les additionne pour obtenir la carte de visualisation de l'encombrement global.

L'analyse des cartes de visualisation de l'encombrenement aide à expliquer la variation des métriques d'encombrenement global mesurées par l'algorithme. La Figure 4.8 montre la carte pour l'écran ayant un encombrement faible. Les régions claires sont celles contribuant le plus à l'encombrenement, alors que les régions foncées ou noires ne contribuent pas. On remarque que tous les instruments ont la même intensité sur la carte, indiquant une contribution à l'encombrenement similaire entre eux. Le fait que la disposition des instruments soit concentrée au centre de l'écran laisse de l'espace vide en périphérie ce qui diminue le résultat d'encombrenement global. L'affichage monochrome a permis de diminuer le niveau d'encombrenement global en réduisant la variabilité de l'attribut de couleur à l'écran.



Figure 4.8 Carte de visualisation de l'encombrenement du PFD ayant un encombrement faible.

La Figure 4.9 présente la carte d'encombrenement de l'écran ayant un encombrement modéré. Le détail le plus marquant de cette visualisation est que l'arrière-plan de couleur disparaît de la carte d'encombrenement, indiquant que cet élément ne contribue pas à l'encombrenement mesuré par

l'algorithme. Les traits et les bordures des instruments apparaissent très clairement sur la carte, indiquant qu'ils ont contribué le plus au résultat d'encombrement global. Particulièrement, la pointe en triangle des lecteurs de vitesse et d'altitude est la région ayant un encombrement local le plus élevé de l'interface. Ceci s'explique par la contribution de l'attribut visuel d'orientation avec la présence des deux traits à 45° de la pointe du triangle au-dessus de la barre vertical, et par l'attribut visuel de couleur avec le changement subit du fond noir de l'instrument avec la couleur cyan du sélecteur de vitesse.



Figure 4.9 Carte de visualisation de l'encombrement du PFD ayant un encombrement modéré.

La Figure 4.10 présente la carte de l'écran ayant un encombrement élevé. Comme pour l'écran précédent, l'arrière-plan de couleur des instruments et de l'horizon artificiel n'est pas visible sur la carte d'encombrement. C'est plutôt la multiplication de lignes, de traits et de bordures des instruments qui contribue le plus à l'encombrement. Les formes complexes, comme les lecteurs de vitesse et d'altitude, affichent l'intensité la plus élevée de la carte, suggérant une région ayant

un encombrement local élevé. Le fait que toute la surface de l'écran soit occupé par de l'information laisse peu d'espace vide, et par conséquent augmente la métrique d'encombrement global.

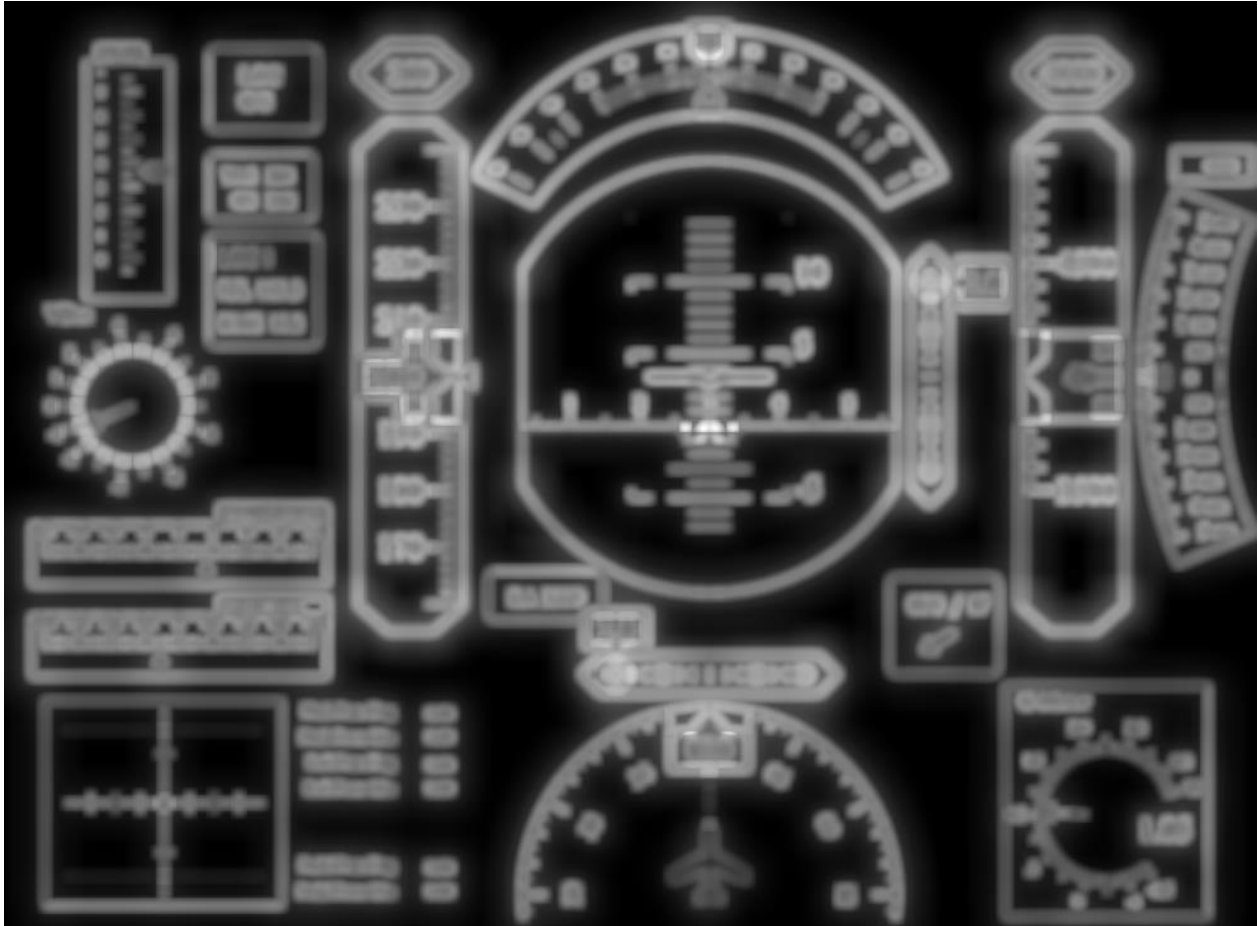


Figure 4.10 Carte de visualisation de l'encombrement du PFD ayant un encombrement élevé.

4.6 Synthèse

Ce chapitre a mis en application les enseignements tirés de la revue de la littérature afin de concevoir trois PFD avec un niveau d'encombrement visuel différent. Nous avons d'abord identifié les besoins d'information pour la tâche et les exigences que doivent respecter les affichages. Puis, nous avons résumé sous forme graphique les facteurs de manipulation de l'encombrement visuel identifiés durant la revue de littérature. La revue des affichages de vol existants a permis d'établir l'étendue du niveau d'encombrement visuel présent dans le poste de pilotage. Ces connaissances nous ont permis de concevoir les trois PFD utilisés pour cette étude,

présentés à la section 4.4. L'analyse du niveau d'encombrement des PFD avec l'algorithme *Feature Congestion* a validé la manipulation de l'encombrement.

Dans cette étude, nous avons utilisé les trois PFD en simulateur de vol afin d'étudier l'effet de l'encombrement visuel sur la performance des pilotes. Le prochain chapitre présente la méthodologie employée pour l'étude expérimentale.

CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour l'expérience réalisée en simulateur de vol. Il est structuré comme suit. La section 1 présente le profil des pilotes qui ont pris part à l'expérience et est suivi à la section 2 par la présentation de l'instrumentation utilisée, soit le simulateur de vol, les questionnaires et l'oculomètre. La section 3 présente la tâche demandée aux participants, soit de réaliser une approche aux instruments, de même que le scénario de vol et la section 4 présente la procédure expérimentale. La section 5 présente en détails les variables indépendantes, soit le niveau d'encombrement et la phase vol, alors que la section 6 présente les 19 variables dépendantes mesurées durant l'étude. Le chapitre se termine en présentant la méthode d'analyse des données et le plan expérimental utilisé pour l'analyse statistique. Le processus d'approbation de l'étude par le comité d'éthique est présenté à la fin.

5.1 Participants

Pour prendre part à l'étude, un pilote devait se qualifier selon deux critères. Premièrement, il devait avoir au moins 100 heures d'expérience de vol aux instruments. Ce critère limite la participation aux pilotes ayant déjà une bonne connaissance de l'écran primaire de vol et des fonctions de guidage. Deuxièmement, le pilote devait être familier avec le poste de pilotage des avions Bombardier. Ce critère réduit le temps nécessaire à l'apprentissage de la dynamique de vol du simulateur.

Douze pilotes ont pris part à cette étude, dont une femme. Les pilotes étaient âgés entre 28 et 60 ans, avec un âge moyen de 41.6 ans. Deux pilotes étaient unilingue anglophone. L'expérience de vol des pilotes variait entre 300 et 12 000 heures de vol, avec une expérience moyenne de 4415 heures de vol. La variation entre l'expérience de vol des participants s'explique par leur carrière professionnelle. Les quatre participants qui ont rapporté avoir moins de 4000 heures de vol sont tous ingénieurs. Bien qu'ils ne volent pas régulièrement, ils ont une connaissance avancée des affichages du poste de pilotage et sont qualifiés pour commenter la qualité des écrans testés pour cette étude. Les trois pilotes qui ont rapporté avoir plus de 6000 heures de vol sont des pilotes de production qui réalisent les premiers vols d'un avion nouvellement produit et le livrent aux clients. Il s'agit de pilotes qui volent quotidiennement et possèdent une expérience approfondie de l'appareil. Les cinq autres pilotes sont des instructeurs de vol. Ils réalisent la formation des

pilotes sur les appareils Bombardier. Bien qu'ils volent moins régulièrement que les pilotes de production, les instructeurs de vol ont une connaissance avancée des systèmes du poste de pilotage et du simulateur de vol. Deux participants ont rapporté avoir déjà volé un avion avec un système de commande électrique (*fly-by-wire*, en anglais), et un seul participant a rapporté avoir été pilote dans les forces de l'air. Les 12 pilotes représentent une bonne diversité d'expérience de vol et sont en mesure de formuler des avis pertinents sur la qualité des affichages testés durant l'étude.

5.2 Appareil et instrumentation

Cette section présente le simulateur de vol et les deux outils de mesure que nous avons utilisés pour l'étude: les questionnaires subjectifs et l'oculomètre.

5.2.1 Simulateur de vol

Les pilotes ont volé dans un simulateur de vol fixe, c'est-à-dire qui ne bouge pas durant le vol, et contrôlé par un mini-manche latéral (*side stick*, en anglais). Le simulateur était situé dans les locaux de Bombardier Aéronautique à Montréal et est utilisé à des fins de recherche et développement en ingénierie. Le simulateur a utilisé un modèle de vol représentatif d'un jet privé avec un système de commande électrique.

La géométrie physique du poste de pilotage était représentative de celle d'un avion d'affaires de Bombardier, et était équipée des commandes de vol nécessaires pour compléter une approche aux instruments: mini-manche latéral, pédalier, manettes des moteurs, manette du train d'atterrissage, manette des ailerons hypersustentateurs et manette des aérofreins (voir Figure 5.1). Le pilote s'est assis dans le siège du capitaine, alors que l'expérimentateur s'est assis dans le siège du premier officier et a joué le rôle du premier officier durant le vol (c.-à-d. il a déployé les ailerons hypersustentateurs et le train d'atterrissage lorsque le pilote l'a demandé).

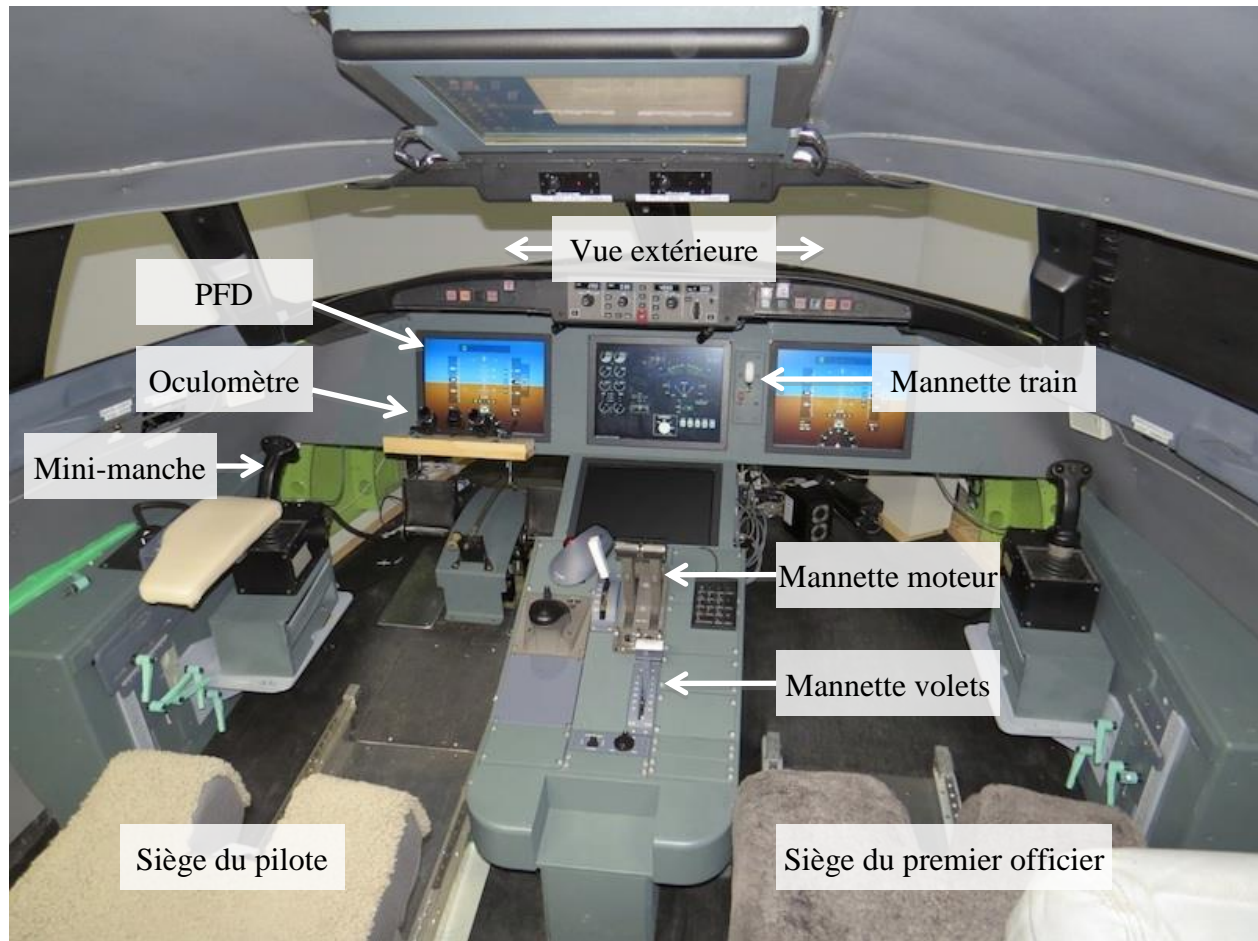


Figure 5.1 Configuration du poste de pilotage durant l'expérimentation.

Le PFD était présenté sur un écran de 30.5 x 22.9 cm situé à une distance de lecture de 86 cm (voir Figure 5.2). La résolution de l'écran était de 1024 x 768 pixels et soutenait un angle visuel de 19.4 x 14.8°. La vue extérieure était projetée sur trois panneaux plats situés à 3.20 m des yeux du pilote, soutenant des angles visuels horizontal de 90.1° et vertical de 39.3°.



Figure 5.2 Géométrie du poste de pilotage par rapport aux yeux du pilote.

Durant chaque essai, le simulateur a enregistré à une fréquence de 50 Hz les données de vol suivantes: déviations latérale et verticale (en points), activité du mini-manche (en degrés) et vitesse verticale (en pieds par minute).

5.2.2 Questionnaires

Nous avons utilisé des questionnaires papier que les participants ont remplis avec un crayon. Tous les questionnaires sont en anglais, car certains participants ne parlaient pas français et tous parlaient anglais. La raison de ce choix est que nous ne voulions courir le risque d'avoir des questions ayant des sens différents dans les versions anglaise et française des questionnaires. Ceux-ci sont présentés aux annexes D à G.

5.2.2.1 Questionnaire de données démographiques

Le questionnaire de données démographiques demandait au participant de spécifier son âge et son expérience de vol (nombre d'heures de vol et nombre d'heures de vol aux instruments). Il est présenté à l'annexe D.

5.2.2.2 Charge mentale de travail (NASA-TLX)

Nous avons utilisé le questionnaire NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) pour mesurer la charge mentale de travail. Le NASA-TLX est un des outils les plus connus et les plus utilisés pour évaluer la charge mentale de travail dans la communauté aéronautique (Hart, 2006). Depuis sa conception, plusieurs études ont montré la validité des mesures obtenues et la robustesse de son diagnostic (Noyes & Bruneau, 2007; William Moroney, 1995). Toutefois, le pouvoir de discrimination de l'outil est modéré pour distinguer la charge de travail entre différentes tâches (Matthews, Reinerman-Jones, Barber, & Abich, 2014; Rubio, Díaz, Martín, & Puente, 2004).

Le NASA-TLX questionnaire comprend deux formulaires présentés à l'annexe E. Le formulaire de classement (*NASA-TLX Mental Workload Rankings*) pondère la contribution de chacun des six facteurs de la charge mentale de travail, soit l'exigence mentale, l'exigence physique, l'exigence temporelle, la performance, le niveau de frustration et l'effort. Le formulaire de classement présente les 15 combinaisons de deux facteurs (p. ex., exigence mentale et exigence physique), et le participant indique lequel des deux facteurs a contribué le plus à la charge mentale de travail. Les participants remplissent le formulaire de classement une seule fois, après le vol de pratique.

Le formulaire d'évaluation (*NASA-TLX Mental Workload Ratings*) demande au participant d'évaluer l'intensité de la contribution de chacun des six facteurs de la charge mentale de travail. Une brève définition accompagne chaque facteur pour guider le participant dans son évaluation.

Nous avons utilisé une échelle à 20 divisions faisant 122 mm de longueur avec les descripteurs ‘faible’ et ‘élevé’ à chaque extrémité pour définir la valeur de l’échelle. Les participants remplissent le formulaire d’évaluation après avoir complété chaque condition expérimentale, pour un total de 9 fois (voir §5.4 pour la procédure expérimentale).

Une fois ces deux formulaires complétés, l’indice de charge mentale de travail pour une condition expérimentale est calculé comme suit : pour chaque participant, compter le nombre de fois qu’un facteur a été choisi sur le formulaire de classement et diviser ce chiffre par le nombre total de comparaisons, soit 15. Il s’agit de la pondération de chaque facteur, avec une contribution maximale de 33% (5/15) et minimale de 0% (0/15). Multiplier la pondération de chaque facteur à sa valeur indiquée sur l’échelle du formulaire d’évaluation (de 1 à 20), et calculer la moyenne pour les six facteurs. Ce résultat est l’indice de charge mentale de travail du participant pour cette condition expérimentale.

5.2.2.3 Évaluation de l’encombrement visuel (*Clutter rating scale*)

Nous avons utilisé le questionnaire d’évaluation de l’encombrement visuel (*Clutter rating scale*) développé par Kaber et ses collègues (2008) pour mesurer le niveau d’encombrement visuel des écrans. Le questionnaire est présenté à l’annexe F. L’utilisation de ce questionnaire est semblable à celle du NASA-TLX. Il débute par une feuille de définitions des six facteurs contribuant à l’encombrement visuel, remise aux participants en début de séance. Le formulaire de classement (*Clutter Rankings*) pondère la contribution de chaque facteur à l’encombrement visuel et est complété de la même manière que pour le NASA-TLX. Le formulaire d’évaluation (*Clutter Ratings*) de l’encombrement comprend six échelles pour déterminer la valeur de chaque facteur. Nous avons utilisé la même échelle à 20 divisions que pour le NASA-TLX. Les descripteurs aux extrémités de l’échelle changent pour chaque facteur. Le Tableau 5.1 présente les paires des descripteurs utilisés tirés de (Kim et al., 2011). Notez que le descripteur du niveau faible correspondait à un écran avec un faible encombrement et avait une valeur de 1 sur l’échelle, alors que le descripteur du niveau élevé correspondait à un encombrement élevé et avait une valeur de 20.

L’indice d’encombrement visuel d’un écran se calcule de la même manière que l’indice de charge mentale de travail, soit la moyenne pondérée des échelles d’évaluation. Le formulaire d’évaluation contenait aussi une septième échelle à 20 divisions demandant au participant

d'évaluer le niveau d'encombrement global de l'écran, avec les descripteurs 'encombrement faible' et 'encombrement élevé' à ses extrémités. Nous référons à cette échelle comme la perception d'encombrement global de l'écran. Celle-ci a été utilisée pour valider l'indice d'encombrement visuel avec la perception du niveau d'encombrement par les participants.

Tableau 5.1 Libellé des descripteurs présentés aux extrémités de l'échelle d'évaluation pour chaque facteur (tiré de (Kim et al., 2011)).

Facteurs	Descripteurs Niveau faible	Descripteurs Niveau élevé
Redundancy	Orthogonal	Redundant
Colorfulness	Monochromatic	Colorful
Salience	Salient	Not salient
Dynamics	Static	Dynamic
Variability	Monotonous	Variable
Density	Sparse	Dense

5.2.2.4 Qualités visuelles

Nous avons utilisé le questionnaire des qualités visuelles de l'interface (Lavie & Tractinsky, 2004) pour évaluer la perception que les participants ont de la qualité esthétique des écrans. Le questionnaire évalue les deux dimensions de l'apparence esthétique d'une interface identifiées par (Lavie & Tractinsky, 2004) soit l'esthétique classique et l'esthétique expressive. Le questionnaire utilisé dans cette étude est présenté à l'annexe G. Il présente les 10 facteurs de qualité visuelle avec une brève définition et le participant indique sa perception de l'écran pour chacune d'elle. Nous avons utilisé la même échelle à 20 divisions que précédemment, mais avec les descripteurs 'fortement en désaccord' et 'fortement en accord' aux extrémités. Nous avons donné une valeur de 1 à la première division identifiée par le descripteur 'fortement en désaccord' qui était associée à une qualité esthétique faible, alors que nous avons donné une valeur de 20 à la dernière division identifiée par le descripteur 'fortement en accord' et associée à une qualité esthétique élevée. Les 10 facteurs de qualité visuelle du questionnaire étaient : propre,

clair, plaisant, symétrique, esthétique, original, sophistiqué, fascinant, créatif, utilise des effets spéciaux.

Pour l'analyse des résultats de qualités visuelles, nous avons utilisé les trois mesures sommatives utilisées par (Gannon, 2005). Les mesures sommatives permettent d'évaluer différentes propriétés de la perception esthétique des interfaces en utilisant une mesure composite de plusieurs sous-facteurs de qualités visuelles. Les mesures sommatives retenues sont la qualité visuelle classique, expressive et globale. Les deux premières mesures reflètent les deux dimensions identifiées par Lavie et Tractinsky (2004) alors que la qualité visuelle globale est une mesure composite de tous les facteurs du questionnaire.

La mesure sommative est calculée comme la valeur moyenne des facteurs qui la composent. Nous avons utilisé une moyenne simple, puisqu'aucune méthode de pondération n'est suggérée dans (Lavie & Tractinsky, 2004). Gannon (2005) a validé cette méthode pour évaluer la perception esthétique d'un écran de vol. Le Tableau 5.2 présente les facteurs de qualité visuelle utilisés pour les mesures sommatives. Nous avons aussi analysé le résultat pour l'échelle 'esthétique', qui est un facteur unique capturant le concept de qualité esthétique d'une interface.

Tableau 5.2 Mesures sommatives de qualités visuelles et les facteurs de qualité esthétique utilisés pour les calculer (tirées de (Gannon, 2005)).

Mesures sommatives de qualité visuelle	Facteurs de qualité esthétique
Esthétique	Esthétique
Classique	Propre, clair, plaisant, symétrique, esthétique
Expressive	Original, sophistiqué, fascinant, créatif, utilise des effets spéciaux
Globale	Propre, clair, plaisant, symétrique, esthétique, original, sophistiqué, fascinant, créatif, utilise des effets spéciaux

5.2.3 Oculomètre

Nous avons utilisé un oculomètre Facelab 5.0 (© Seeing Machines) pour enregistrer le regard du pilote sur l'écran du PFD à une fréquence de 60 Hz. Nous avons placé les caméras sous l'écran, sur un support fixe fabriqué pour ce test, à une distance de 65 cm des yeux du pilote avec un

angle de 40° par rapport au sol. Durant les tests préliminaires, nous avons trouvé que cette position offrait les résultats les plus fiables et réduisait la surface de l'écran masquée par les caméras. Les caméras ont couvert la portion inférieure de l'écran (moins de 4 cm en hauteur). Le masquage de l'écran n'a pas causé de problème durant l'expérimentation car aucune information essentielle ne se trouvait dans la zone masquée et aucun participant ne s'est plaint du masquage.

Nous avons calibré l'oculomètre au début de la session de test avec chaque pilote. La calibration était vérifiée à nouveau après la moitié des essais. Nous avons été incapables de calibrer l'oculomètre avec les cinq participants portant des lunettes. Le verre des lunettes reflétait le signal infrarouge utilisé par l'oculomètre pour suivre la pupille et ne permettait pas d'enregistrer la position du regard. La calibration a cependant bien fonctionné avec les participants portant des lentilles cornéennes. Nous avons aussi dû éliminer les résultats d'oculométrie de deux autres participants (pilote 2 et 8): ceux-ci ont demandé d'augmenter la luminosité dans le poste de pilotage pour faciliter la lecture de l'écran. Toutefois, la luminosité supplémentaire des lumières de tête a créé un reflet sur les yeux du participant et a interféré avec le suivi de la pupille. Les résultats pour ces participants n'étaient pas fiables.

Le visionnement des enregistrements vidéo du parcours visuel de chaque participant à l'étape de l'analyse des données a révélé un problème de calibration avec le pilote 5. La position de l'écran où son regard a été posé le plus longtemps devrait être au centre de l'horizon artificiel, mais elle était décalée pour se trouver à gauche de l'indicateur de déviation latérale. De plus, l'ampleur des saccades de son patron visuel était trop petite pour être réaliste. Ce type de résultats indique que l'oculomètre n'a pas retenu la calibration du regard du participant. Nous avons décidé de retirer les résultats d'oculométrie de ce participant afin de ne pas fausser les résultats des autres participants dont la calibration a bien fonctionné.

Cela nous a laissé quatre participants avec des données valides d'oculométrie, soit les pilotes 3, 4, 9 et 10. Leurs résultats sont présentés au chapitre suivant.

5.3 Tâche et scénario de vol

La tâche demandée aux pilotes a été de compléter une approche aux instruments ILS en simulateur de vol à la piste 06 gauche de l'aéroport Montréal-Pierre Elliott Trudeau (CYUL, Canada) dont la procédure est présentée à la Figure 5.3. Il s'agissait d'une approche manuelle

utilisant les données brutes de vol (*raw data*, en anglais). Les indicateurs de déviations verticale et latérale ont offert l'information de guidage, de manière à ce que le pilote regarde activement le PFD pour obtenir les informations de vol. Il n'y avait pas d'assistance pour l'approche : le pilote automatique, l'auto-mannette, le directeur de vol et le vecteur de vol étaient tous inactifs afin d'augmenter la charge de travail et d'encourager le pilote à contrôler manuellement les manœuvres de l'appareil et la puissance des moteurs.

Le vol a été fait avec des conditions météorologiques de vol aux instruments (*Instrument meteorological conditions*, IMC). Le plafond nuageux était de 400 pieds avec une visibilité réduite de 2.0 milles terrestre américain (*statute mile*, en anglais) dans le brouillard. Un vent de travers de l'est (90°) soufflait à 17 nœuds. Les conditions IMC ont assuré que le pilote conserve la tête basse et regarde le PFD durant toute l'approche puisqu'il ne pouvait pas utiliser les repères visuels de l'environnement extérieur.

La simulation a débuté avec l'appareil situé à 6 milles nautiques du point de capture du radiophare d'alignement de piste, identifié par le point Xulta sur la procédure d'approche (voir Figure 5.3). L'appareil avait un cap initial de 30 degrés, une altitude de 4000 pieds au-dessus du sol et une vitesse indiquée de 200 nœuds. Une copie de la procédure d'approche, des conditions météorologiques et des conditions initiales de l'appareil a été remise aux pilotes au début de l'expérience.

Les pilotes ont reçu la consigne de conserver le cap initial jusqu'à la capture du signal de radiophare d'alignement de piste. Ensuite, ils ont suivi l'indicateur de déviation latérale afin de demeurer alignés avec la piste et ils ont capté le signal d'alignement de descente pour commencer la descente. Puis ils devaient suivre les indications de déviations latérale et verticale le plus précisément possible durant l'approche. Ils devaient avoir une approche stabilisée —c.-à-d. les volets déployés, les trains sortis et avoir atteint la vitesse finale de 123 nœuds— en croisant le repère d'approche finale (*Final approach fix*, FAF) Birpo situé à 3.5 milles nautiques de la piste (voir Figure 5.3). Les pilotes n'avaient pas à poser l'appareil sur la piste et la simulation s'est terminée lorsque l'appareil a atteint 200 pieds.

MONTRÉAL/PIERRE ELLIOTT TRUDEAU INTL
MONTRÉAL QC

ILS/DME or LOC/DME RWY 06L

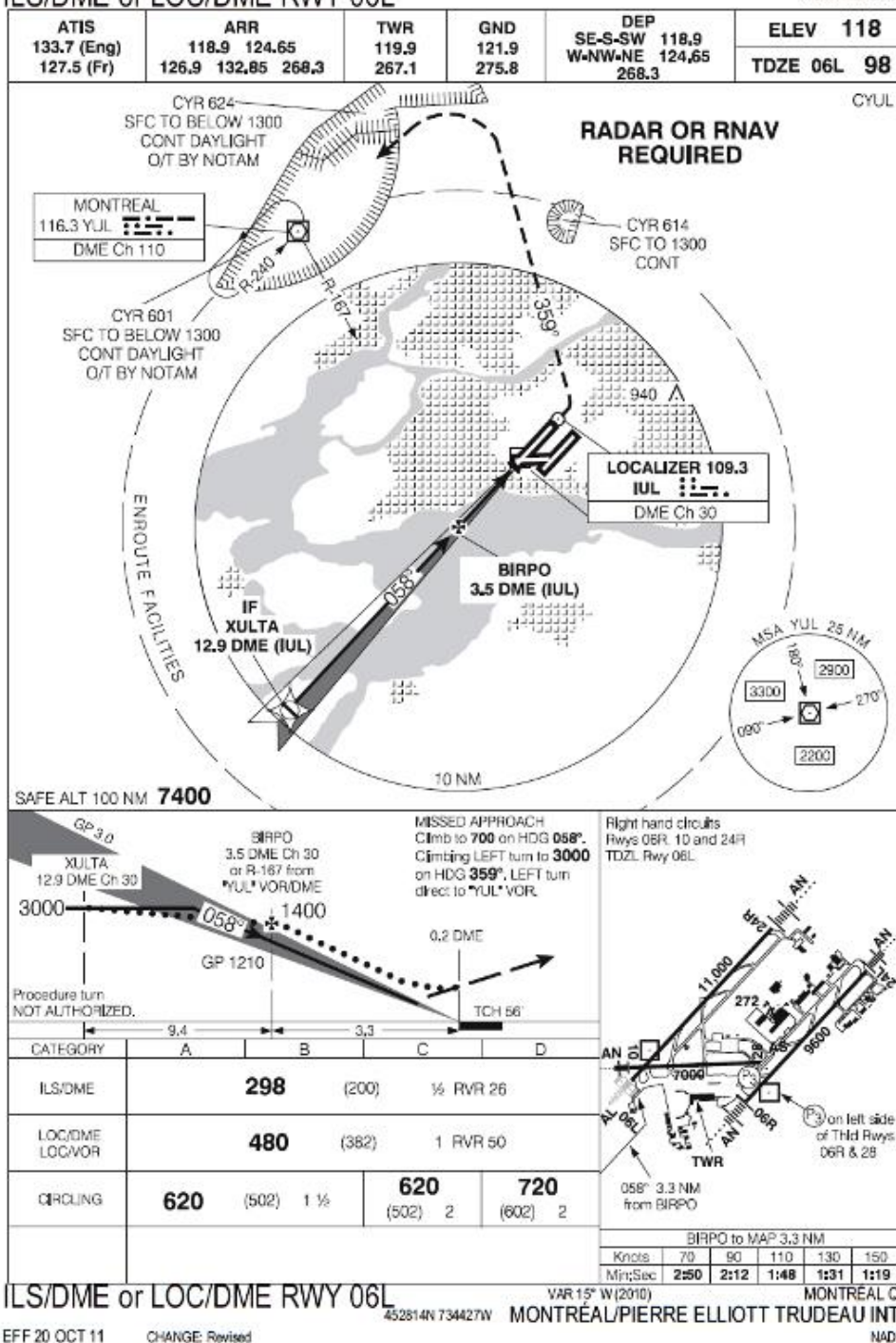


Figure 5.3 Procédure d'approche aux instruments de l'aéroport de Montréal (CYUL, Canada) pour la piste 06 gauche. Le point de capture du radiophare d'alignement de piste est *Xulta* et le repère d'approche finale est *Birpo*.

5.4 Procédure

La séance de test avec chaque pilote s'est déroulée comme suit. L'expérimentateur a accueilli le pilote dans le simulateur de vol et l'a informé de la tâche demandée, soit de réaliser une approche aux instruments décrite à la section 5.3. Le pilote a ensuite lu et signé le formulaire d'information et de consentement à la recherche, avant de compléter le questionnaire de données démographiques sur son expérience de vol.

Le pilote a pris place dans le simulateur de vol en s'asseyant sur le siège gauche du pilote et a ajusté sa position pour que ses yeux soient à une distance de 86 cm de l'écran du PFD. L'expérimentateur a vérifié la distance avec une règle. Le pilote a aussi ajusté la position de l'appui-bras pour tenir confortablement le mini-manche.

L'expérimentateur a calibré l'oculomètre avec le regard du pilote, ce qui durait environ cinq minutes. Ce dernier devait fixer le centre de l'écran durant quelques secondes pour que l'appareil identifie sa pupille. Puis, le pilote a fixé un point apparaissant successivement aux quatre coins de l'écran afin que l'oculomètre corrèle la position du regard avec les coordonnées à l'écran. L'oculomètre affiche la dispersion des fixations autour des coins afin de s'assurer de la validité de la calibration. Si la dispersion autour d'un point était supérieure à 2.5 degrés, nous reprenions la calibration. Si la dispersion des fixations était toujours inacceptable après trois reprises de la calibration, nous arrêtons la mesure d'oculométrie avec ce participant car nous jugions que la calibration n'était pas fiable. Cela a été le cas pour les cinq participants portant des lunettes (ref §5.2.3). La calibration a été vérifiée à nouveau après la moitié de la séance de test. Au début de chaque approche, l'expérimentateur a démarré l'enregistrement des données d'oculométrie.

Le pilote a complété une approche de pratique afin de se familiariser avec les contrôles de vol et la dynamique de l'avion. La tâche de vol a été la même que celle décrite à la section 5.3, mais sans vent de travers et sans conditions météorologiques aux instruments. Pour cette approche de pratique, le pilote a utilisé le PFD conventionnel du Bombardier Global. Une fois l'approche complétée, il a rempli deux formulaires, soit (1) le formulaire de classement du NASA-TLX et (2) le formulaire de classement de l'encombrement visuel. Le pilote avait la possibilité de reprendre le vol de pratique s'il avait encore des interrogations sur le déroulement du test ou s'il ne se sentait pas prêt pour le test. Toutefois, aucun participant n'a demandé de reprendre le vol de pratique durant notre étude.

La séance de test formelle a débuté après l'essai de pratique. Le pilote a réalisé un total de neuf approches IMC (ref §5.3) divisées en trois groupes de trois répétitions. Chaque groupe correspond à un PFD différent, décrit à la section suivante. Le pilote a donc complété trois répétitions de l'approche en utilisant un PFD, avant d'utiliser le PFD suivant. L'ordre de présentation des PFDs a été contrebalancé entre les participants dans un plan intra-sujets (Mackenzie, 2013) et est présenté à l'annexe H.

Après avoir réalisé les trois répétitions pour un écran, le pilote a complété le formulaire d'évaluation de la charge de travail NASA-TLX, le formulaire d'évaluation de l'encombrement visuel et le formulaire de qualités visuelles. Le pilote a complété ces formulaires assis au simulateur avec le PFD visible à l'écran. Le pilote a aussi fait des commentaires verbaux sur la conception de l'écran et les éléments contribuant soit à distraire son attention ou à l'aider dans sa tâche. L'expérimentateur a noté ces observations.

Une fois les neuf approches complétées, l'expérimentateur a réalisé une entrevue semi-dirigée avec le pilote lui demandant d'indiquer lequel des trois écrans il a trouvé le plus encombré (et désencombré) et quels étaient les éléments à l'écran contribuant à l'encombrement (et au désencombrement). La durée totale de la séance de test a été de 2h30.

5.5 Variables indépendantes

Les deux variables indépendantes de l'étude ont été le niveau d'encombrement du PFD et l'étape de vol. Nous décrivons en détails les deux variables ci-dessous.

5.5.1 Niveau d'encombrement visuel du PFD

La variable indépendante principale de l'étude est le niveau d'encombrement visuel du PFD. Cette variable a pris trois valeurs : encombrement faible, encombrement modéré et encombrement élevé. Nous avons conçu trois PFD pour cette étude, un pour chaque niveau d'encombrement. Le Chapitre 4 a présenté la méthode de conception des affichages, et les affichages sont présentés à la section 4.4.

5.5.2 Étape de vol

Pour l'analyse des résultats, nous avons divisé l'approche en deux étapes de vol afin de voir si le comportement des pilotes a différé entre celles-ci. Nous avons nommé la première étape de vol « l'approche initiale ». Elle a débuté lorsque l'appareil a été établi sur son vecteur d'approche et a franchi la distance de 7.5 milles nautique par rapport à la piste, et elle s'est terminée lorsque l'appareil croise le FAF. Durant l'approche initiale, le pilote a déjà capté les signaux de l'alignement de descente et du radiophare d'alignement de piste. Il doit suivre le guidage des indicateurs de déviations latérale et verticale, tout en diminuant sa vitesse pour atteindre la vitesse finale d'approche.

Nous avons nommé la seconde étape de vol « l'approche finale ». Elle a débuté là où s'est terminée l'approche initiale, soit lorsque l'appareil croise le FAF et s'est terminée lorsque l'appareil perce le couvert nuageux à une altitude de 400 pieds. Nous avons choisi cette étape car elle est critique pour l'atterrissage, elle exige une charge de travail élevée pour le pilote et elle nécessite que l'appareil soit stabilisé à ce point. La fin de l'étape à 400 pieds est justifiée car à cette altitude le pilote pouvait quitter le PFD des yeux pour regarder à l'extérieur pour compléter l'atterrissage.

Ces deux étapes correspondent à deux objectifs de performance du point de vue du pilote. Durant l'approche initiale, le pilote doit *configurer* l'appareil pour stabiliser l'approche (vitesse, taux de descente, déploiement des volets et du train). Durant l'approche finale, le pilote doit *minimiser* la déviation des indicateurs de déviations latérale et verticale afin d'aligner l'appareil avec la piste et réaliser une approche en douceur.

On s'attend à ce que les résultats indiquent une performance technique de vol inférieure durant l'étape d'approche finale, car celle-ci impose au pilote une pression temporelle accrue et une charge de travail supérieure que l'approche initiale.

5.6 Variables dépendantes et traitement des données

Nous avons mesuré l'effet de l'encombrement visuel des écrans sur un ensemble de variables dépendantes subjectives et objectives, soit l'évaluation de l'encombrement visuel, la charge mentale de travail, la qualité visuelle de l'interface, la performance technique de vol, et le

parcours visuel. Cette section présente les variables dépendantes mesurées durant l'étude et la méthode appliquée pour le traitement des données.

5.6.1 Évaluation de l'encombrement visuel

Les pilotes ont évalué le niveau d'encombrement visuel des trois PFDs avec l'échelle d'évaluation de l'encombrement présentée à la section 5.2.2.3. Cette évaluation donne un résultat numérique variant de 1 (encombrement faible) à 20 (encombrement élevé). Cette variable dépendante permet de vérifier que nous avons bien manipulé le niveau d'encombrement des écrans testés et comment les pilotes ont perçu les écrans.

5.6.2 Charge mentale de travail

Les pilotes ont évalué le niveau de charge mentale de travail des trois PFDs avec l'échelle du NASA-TLX présentée à la section 5.2.2.2. Cette évaluation donne un résultat numérique variant de 1 (charge faible) à 20 (charge élevée). Cette variable dépendante permet de mesurer le niveau d'effort et de concentration des pilotes pour compléter l'approche avec chacun des écrans.

5.6.3 Qualités visuelles

Les pilotes ont évalué la qualité esthétique des trois PFDs avec l'échelle de qualités visuelles présentée à la section 5.2.2.4. Cette évaluation donne un résultat numérique variant de 1 (qualités visuelles faibles) à 20 (qualités visuelles élevées). Nous présentons le résultat pour quatre variables, soit la qualité visuelle globale, la qualité visuelle classique, la qualité visuelle expressive et la qualité esthétique.

5.6.4 Performance technique de vol

Les deux variables indiquant la précision de l'approche sont les déviations latérale et verticale moyennes (en point). Une déviation de zéro point signifie que l'avion est parfaitement aligné avec la piste d'atterrissage et suit la pente de descente prescrite. Nous avons calculé la moyenne simple de la valeur absolue de la déviation pour chacune des deux variables. Nous avons pris la valeur absolue car le simulateur a enregistré une déviation latérale à gauche de la piste (et une déviation verticale sous la pente) comme une valeur négative, et une déviation latérale à droite de

la piste (et une déviation verticale au-dessus de la pente) comme une valeur positive. La moyenne a été calculée pour les deux étapes de vol (réf. §5.5.2).

La valeur moyenne renseigne sur la précision globale de l'approche, mais ne renseigne pas sur la stabilité de l'approche. Pour cela, nous avons calculé l'écart-type de la déviation durant une étape de vol. Nous référons à cette variable comme le *contrôle de la déviation*. La variable de contrôle est une mesure de la variation par rapport à la moyenne. Un contrôle avec une valeur nulle indique que l'avion a conservé une déviation latérale (ou verticale) constante durant toute l'approche, ce qui est préférable. Un contrôle avec une valeur élevée indique que l'avion a zigzagué durant l'approche, ce qui est à éviter.

Nous avons analysé l'activité du mini-manche sur les axes de tangage et de roulis (en degré). Comme précédemment, nous avons calculé la moyenne et le contrôle du mini-manche sur les deux axes durant les deux étapes de vol. L'activité du mini-manche est la commande d'angle de tangage et de roulis faite par le pilote sur le manche. Nous avons analysé l'activité du mini-manche plutôt que l'angle de tangage et de roulis de l'avion car un avion à commande électrique filtre la commande du pilote; la tenue de l'avion peut demeurer stable même si le pilote réalise des commandes au manche.

Finalement, nous avons analysé la valeur moyenne et le contrôle de la vitesse verticale (en pied par minute) de l'appareil durant l'étape finale de l'approche. La vitesse verticale moyenne renseigne sur le taux de variation de l'altitude de l'appareil, et donc sur la douceur de l'approche réalisée. Une vitesse verticale constante durant l'approche, indiquant un taux de descente stable, est préférable.

Nous avons conçu des scripts Matlab® version 2010b pour automatiser l'extraction des données obtenues du simulateur de vol. Nous avons conçu une macro Excel® pour le regroupement des résultats cumulatifs et leur analyse dans un tableur. Nous avons réalisé l'analyse statistique de ce tableur avec le logiciel Statistica® (voir §5.7). Cette approche a facilité le processus d'analyse des données en automatisant les tâches répétitives et en réduisant le risque d'erreur humaine dans le traitement des données.

5.6.5 Parcours visuel

Nous avons retenu neuf variables dépendantes pour le parcours visuel que nous jugeons les plus pertinentes pour mieux comprendre l'effet de l'encombrement visuel. Plusieurs d'entre elles sont tirées des métriques d'encombrement visuel présentées au chapitre de revue de la littérature.

La première variable est la carte de visualisation du regard des participants (*heat map*, en anglais). C'est une visualisation des régions de l'écran qui ont attiré le regard des participants. Celle-ci superpose une carte utilisant un gradient de couleurs (de rouge à bleu) à une image statique de l'écran. La couleur rouge indique les régions de l'écran où le participant a regardé le plus longtemps (*les régions chaudes*), alors que la couleur bleue signifie que le participant a peu regardé ces régions de l'écran (*les régions froides*). Nous avons cumulé les coordonnées du regard des quatre participants et des trois répétitions durant les deux étapes de vol. Nous avons utilisé un filtre gaussien pour calculer la fonction de densité de probabilité²¹, puis nous avons superposé cette fonction sur une image du PFD pour obtenir la carte de visualisation²².

Nous avons calculé les huit autres variables à partir des fixations des participants. Nous avons fixé le seuil d'une fixation à 75 millisecondes et 0.5° d'angle visuel.

La durée d'une fixation (milliseconde) est la moyenne de la durée de toutes les fixations réalisées durant l'étape de vol. Elle renseigne sur la facilité qu'a le participant à extraire l'information pertinente de l'écran.

Nous avons calculé la longueur d'une saccade (en pixel) comme la distance euclidienne moyenne entre les coordonnées (x,y) de deux fixations successives.

Pour le nombre de transitions, nous avons compté le nombre de fois que deux fixations successives ne sont pas dans la même zone. Nous avons utilisé une grille de 14 x 10 zones

²¹ Nous avons utilisé la bibliothèque matlab `gkde2` pour cette étape. Voir (Cao, Y., 2008, *Bivariate Kernel Density Estimation (V2.1)*, en ligne, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19280-bivariate-kernel-density-estimation-v2-1>, page consultée le 30 janvier 2014).

²² Nous avons utilisé la bibliothèque matlab `sc` pour cette étape. Voir (Woodford, O., 2007, *SC - powerful image rendering*, en ligne, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16233-sc-powerful-image-rendering>, page consultée le 30 janvier 2014).

uniformément distribuées pour obtenir un résultat suffisamment granulaire concernant les transitions. Chaque zone avait une taille de $1.5 \times 1.5^\circ$ d'angle visuel. Ce résultat renseigne sur la facilité du participant de maintenir son patron visuel de contrôle, et donc de surveiller les instruments de vol.

Nous avons calculé la surface couverte par les fixations comme la plus petite surface convexe qui encercle toutes les fixations réalisées durant l'étape de vol. Ce résultat renseigne sur la superficie de l'écran balayée par le regard du participant et est lié à la longueur moyenne d'une fixation.

Nous avons construit deux régions d'intérêt (*Region of interest ROI*, en anglais) autour des indicateurs de déviation latérale et verticale, car ces instruments offrent la fonction de guidage de l'appareil. La ROI était centrée sur l'indicateur et avait une taille de $3.0 \times 1.5^\circ$ pour l'indicateur de déviation latérale et de $1.5 \times 3.0^\circ$ pour l'indicateur de déviation verticale. La taille des ROIs était suffisante pour bien encadrer l'instrument et avait assez de marge pour compter les dérives de l'œil durant l'expérimentation. Le fait que les deux ROIs occupaient la même surface facilite la comparaison de leurs résultats. Pour chacune des régions d'intérêt, nous avons analysé le nombre total de fixations réalisées à l'intérieur du ROI durant l'étape de vol et le temps total des fixations réalisées (en seconde).

Nous avons conçu des scripts Matlab® version 2010b pour automatiser l'extraction des données d'oculométrie et réaliser toutes les analyses décrites précédemment. Les scripts ont exporté les résultats cumulatifs dans un tableur Excel® pour tracer les graphiques de tendance.

5.7 Analyse des résultats

Nous avons analysé les résultats en utilisant la méthode factorielle complète d'analyse de la variance intra-sujets (*full factorial within-subjects Anova*) car chaque participant a répété l'expérimentation dans toutes les conditions.

Pour toutes les analyses, nous avons fixé un seuil de signification à 95% ($\alpha = 0.95$). Nous avons utilisé le test de Mauchly pour vérifier le respect de l'hypothèse de sphéricité de la variance. En cas de non-respect, nous avons utilisé les degrés de liberté corrigés de Greenhouse-Geisser. Ceux-ci sont généralement considérés comme plus conservateurs que la correction de Huynh-Feldt et réduisent le risque de commettre une erreur de type I (c.-à-d. conclure à un effet significatif alors qu'il ne l'est pas). Si un facteur a montré un effet significatif, nous avons

effectué le test post-hoc de Tukey HSD (*Tukey honest significant difference*) de ce facteur pour identifier les paires de conditions dont les moyennes sont significativement différentes. Nous avons réalisé tous les tests statistiques avec le logiciel Statistica ® version 8.0.

5.7.1 Plan expérimental

Nous avons utilisé un plan expérimental différent selon le type de résultats visés. Par exemple, les participants ont réalisé trois répétitions de l'approche pour chaque condition, tandis qu'ils ont complété les formulaires une seule fois par condition (à la fin des trois approches). Cette section décrit le plan expérimental utilisé pour l'analyse des résultats.

Pour les résultats obtenus par les formulaires, nous avons défini un plan expérimental intra-sujet avec un facteur, soit l'encombrement visuel, avec trois valeurs : faible, modéré, élevé.

Pour les résultats de performance technique de vol, nous avons défini trois facteurs dans un plan expérimental intra-sujet 3 x 2 x 3. Il s'agit de l'encombrement visuel (faible, modéré, élevé), l'étape de vol (initiale, finale) et la répétition de l'approche (trois répétitions). Toutefois, nous ne présentons pas l'effet du facteur de répétition car il n'est pas d'intérêt pour l'étude; nous nous attendons à ce que les participants soient meilleurs à la troisième répétition qu'à la première, et c'est pour cette raison que nous avons construit un plan expérimental avec trois répétitions. Cela nous permet de calculer la moyenne des résultats sur les trois répétitions pour augmenter la puissance statistique de l'analyse pour la variable d'intérêt, soit l'encombrement visuel.

Pour les résultats d'oculométrie, la taille de l'échantillon de participants ($n=4$) limite la pertinence des méthodes d'analyse de la variance, car l'intervalle de confiance est inversement proportionnel au nombre de sujets. En fait, tous les tests d'analyse de la variance réalisés sur les résultats de parcours visuel affichent des barres d'incertitudes représentant plus de 100% de la valeur de la variable dépendante étudiée et concluent, sans surprise, à l'absence d'effet significatif de l'encombrement visuel (tous les $ps > .10$). C'est pourquoi nous avons plutôt procédé à une analyse descriptive des résultats du parcours visuel. Pour chaque variable dépendante, nous présentons le graphique de la valeur moyenne en fonction du niveau d'encombrement du PFD et, s'il y a lieu, du segment de vol. Les barres d'incertitudes sur les graphiques sont l'écart-type entre les quatre participants et les trois répétitions. Nous commentons la tendance observée entre les niveaux d'encombrement, tout en sachant que la

différence n'a pas atteint le niveau de signification statistique à cause de la taille de l'échantillon de participants.

5.8 Approbation du comité éthique de la recherche avec des sujets humains

Le comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal a émis un certificat de conformité éthique de la recherche avec des sujets humains pour cette étude le 2 juin 2012. Une copie du certificat de conformité est présentée à l'annexe A.

Nous avons d'abord sollicité les participants en décembre 2012 pour une étude pilote. La sollicitation s'est faite par courriel à l'intention des pilotes à l'emploi de Bombardier. Le message de sollicitation est présenté à l'annexe B. Huit participants ont répondu à cet appel pour prendre part à l'étude pilote. Les résultats de l'étude pilote ont servi à calibrer les stimuli expérimentaux et ne sont pas reportés dans cette thèse. Nous avons sollicité les participants à nouveau en octobre 2013. Douze pilotes ont répondu à l'appel et pris part à l'étude du 21 octobre au 1 novembre 2013. Les résultats de ces 12 pilotes sont analysés et présentés par la suite. Tous les participants ont complété le formulaire d'information et de consentement à la recherche avant de commencer l'étude. Le formulaire d'information et de consentement à la recherche est présenté à l'annexe C.

Nous avons fixé comme objectif la participation de 24 pilotes à l'étude. Toutefois, nous n'avons pu obtenir autant de participants car le nombre de pilotes disponibles à Bombardier est limité, leur participation était volontaire et se faisait durant les heures de travail, et nous avons eu accès au simulateur de vol que durant les deux dernières semaines d'octobre 2013. Ces contraintes étant connues, nous avons eu accès à un bassin de participants compétents pour cette étude.

CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats et la discussion de l'expérience réalisée en simulateur de vol. Elle débute avec les résultats vérifiant s'il y a eu un effet de l'ordre de présentation des écrans sur les variables dépendantes. Ensuite, cette section présente les résultats d'intérêts d'un effet de l'encombrement visuel. L'ordre de présentation des résultats se fait en trois groupes : d'abord les résultats subjectifs obtenus par questionnaires, puis les mesures de performance technique de vol prises par le simulateur, et finalement les résultats d'oculométrie.

6.1 Ordre de présentation

Nous avons réalisé une série d'analyses de la variance afin de vérifier la présence d'un effet de l'ordre de présentation des écrans sur l'ensemble des variables dépendantes étudiées. Si un effet d'ordre devait être trouvé, cela limiterait la portée des résultats de cette étude car l'ordre de présentation serait une variable confondante de l'encombrement visuel.

Le Tableau 6.1 présente les résultats des analyses de la variance pour le facteur d'ordre de présentation des écrans. Aucun test n'a atteint le niveau de signification de 95% (tous les $ps > .10$). Ce résultat montre que le plan expérimental utilisé a permis de balancer un effet d'ordre de présentation entre les participants.

Tableau 6.1 Aucun effet significatif de l'ordre de présentations des PFDs n'a été observé.

Variable	Ordre de présentation des PFDs
Niveau d'encombrement visuel perçu	ns
Niveau d'encombrement global	ns
Charge mentale de travail	ns
Qualités visuelles	ns
Durée de l'étape de vol	ns
Déviations latérale moyenne	ns
Contrôle de la déviations latérale	ns
Déviations verticale moyenne	ns
Contrôle de la déviations verticale	ns
Activité moyenne du mini-manche en roulis	ns
Contrôle de l'activité du mini-manche en roulis	ns
Activité moyenne du mini-manche en tangage	ns
Contrôle de l'activité du mini-manche en tangage	ns
Vitesse verticale moyenne	ns
Contrôle de la vitesse verticale	ns

6.2 Résultats subjectifs

Les participants ont répondu à trois questionnaires après avoir complété les trois approches pour chaque écran, soit le niveau d'encombrement perçu de l'écran, la charge mentale de travail et la qualité visuelle perçue de l'écran. Cette section présente les résultats de ces questionnaires dans cet ordre.

6.2.1 Niveau d'encombrement perçu

La Figure 6.1 présente la contribution moyenne de chaque facteur à l'encombrement visuel. La contribution maximale théorique d'un facteur est de 33%. Le facteur de densité a été celui qui a contribué le plus à la perception d'encombrement visuel selon les participants, avec une fréquence de 24.8%. Suivent avec une contribution semblable les facteurs de redondance (17.6%), dynamique (17.0%), variabilité (17.0%) et salience (15.2%). Le facteur de couleur a contribué le moins à l'encombrement, avec une fréquence de 8.5%.

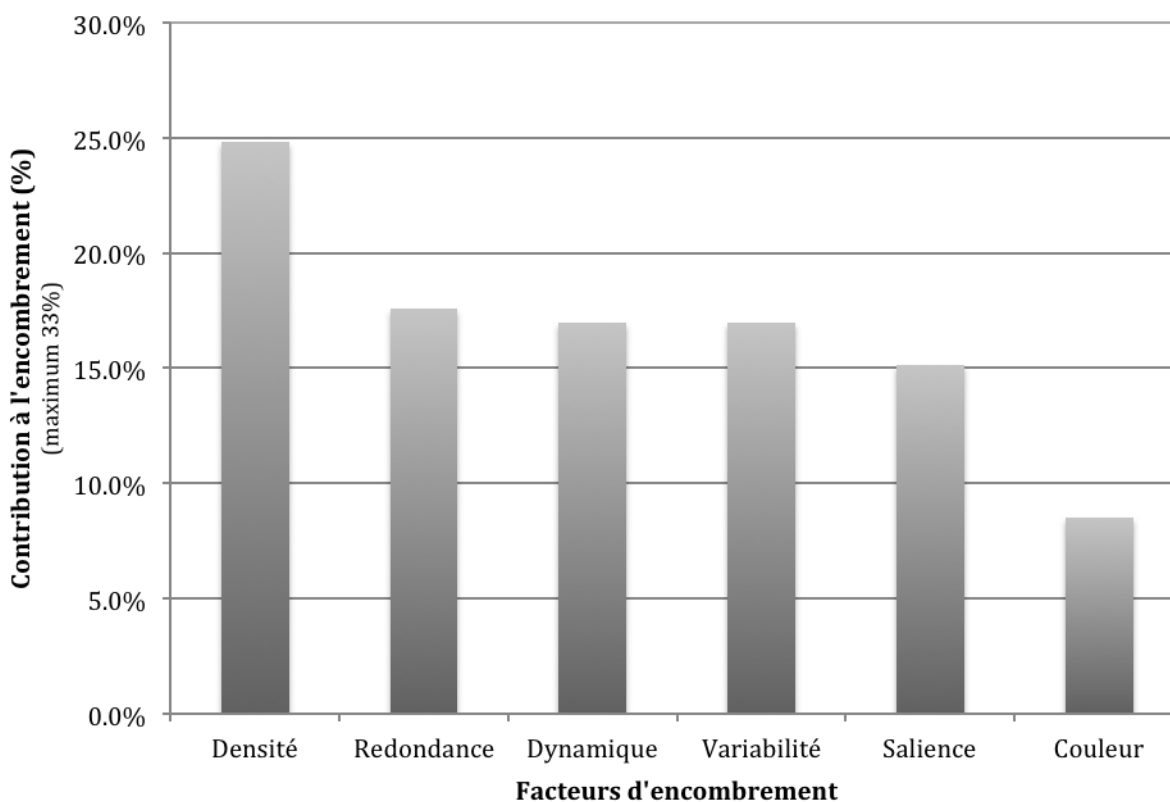


Figure 6.1 Contribution de chaque facteur à l'encombrement visuel de l'écran. La contribution maximale théorique d'un facteur est de 33%.

La Figure 6.2 présente la relation entre le niveau d'encombrement du PFD tel qu'établi durant la conception et le niveau d'encombrement perçu par les participants. Sur cette figure, comme pour toutes les figures suivantes, les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance de 95%. L'écran ayant un encombrement faible a un niveau d'encombrement perçu de 5.50, l'écran ayant un encombrement modéré a un niveau d'encombrement perçu de 9.97, alors que l'écran ayant un

encombrement élevé a un niveau d'encombrement perçu de 13.89. L'effet du niveau d'encombrement du PFD sur le niveau d'encombrement perçu a été fortement significatif ($F_{2,22} = 42.39, p < .00000005$). Le test post-hoc de Tukey HSD a montré que le niveau d'encombrement perçu de chaque écran a été significativement différent de celui des autres écrans (tous les $ps < .001$).

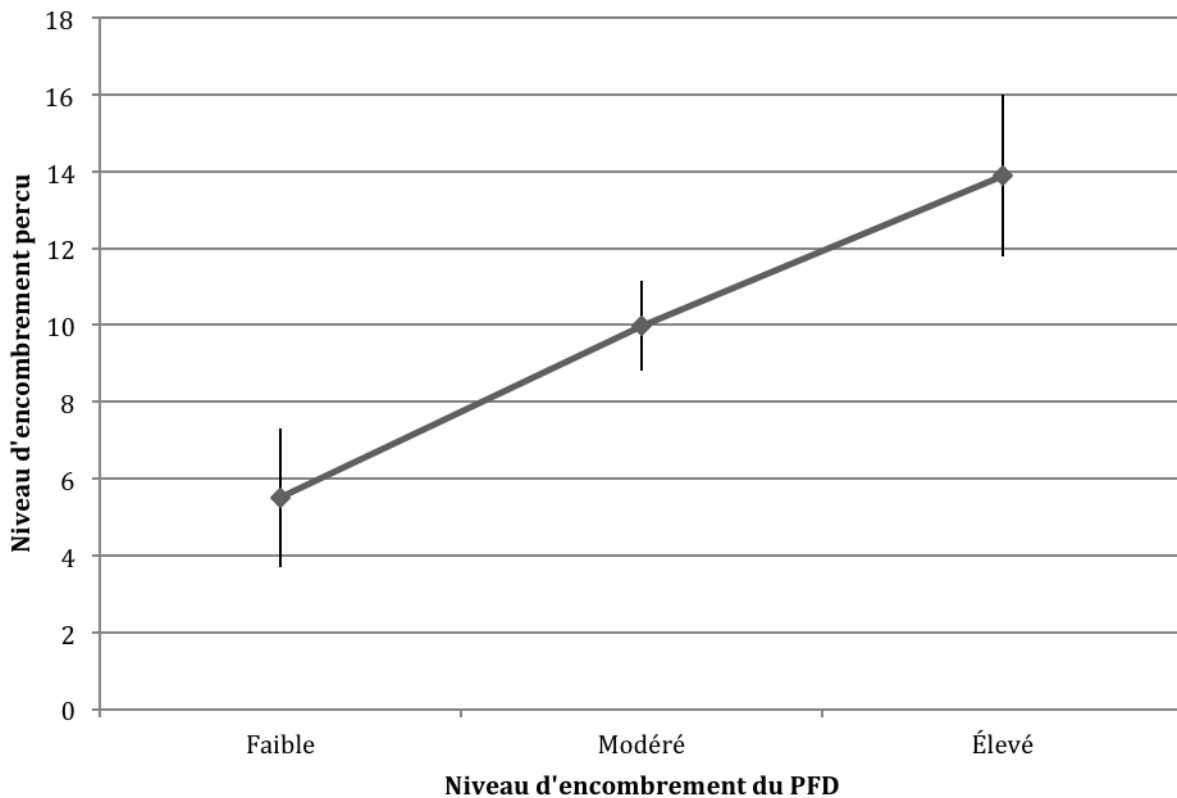


Figure 6.2 Relation entre le niveau d'encombrement de l'écran tel qu'établi au moment de la conception et le niveau d'encombrement perçu par les participants.

L'échelle de niveau d'encombrement perçu développé par (Kaber et al., 2008) a bien prédit la perception d'encombrement global de l'écran tel que jugée par les participants ($\beta = 0.85, t(34) = 9.41, p < .0000001$). La Figure 6.3 présente l'encombrement global de l'écran jugée par les participants pour tous les PFDs en fonction du niveau d'encombrement perçu pour cet écran avec l'échelle de (Kaber et al., 2008). La figure montre une bonne prédiction entre les deux niveaux, avec le niveau d'encombrement perçu expliquant 72% de la variance de la perception d'encombrement global ($r^2 = 0.723, F_{1,34} = 88.73, p < .0000000001$).

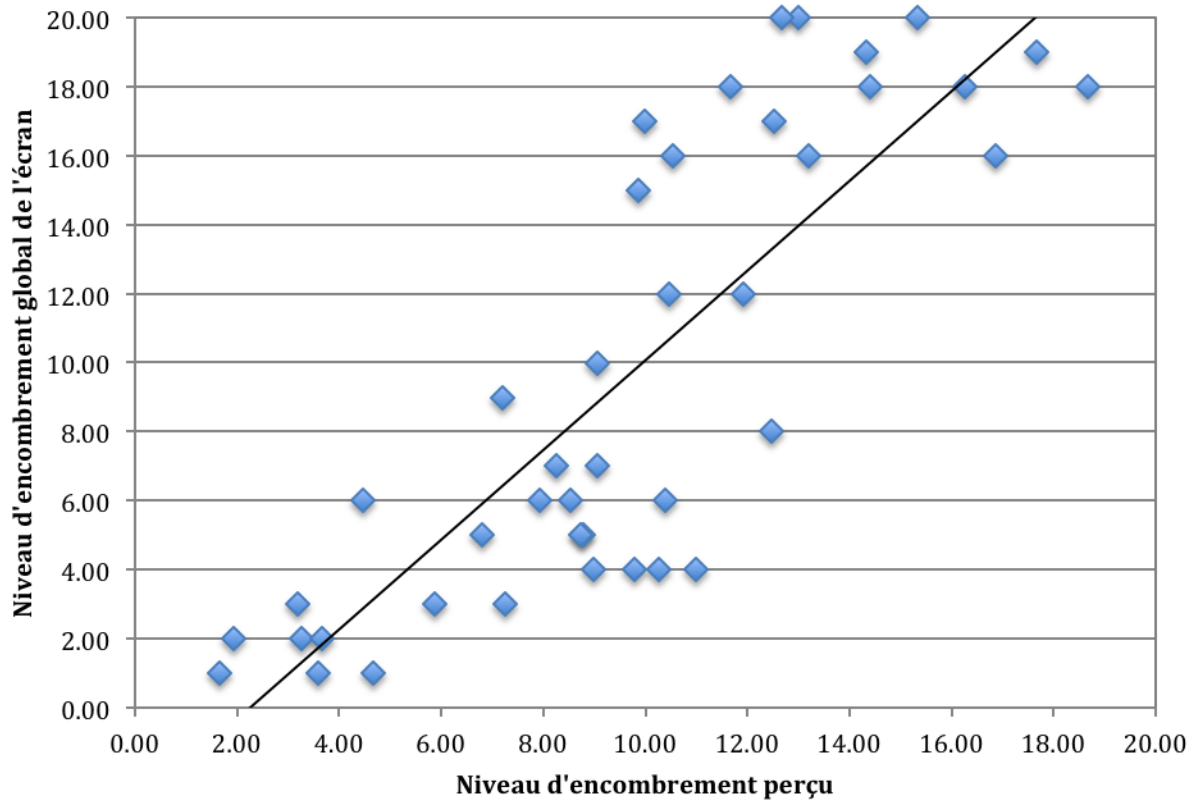


Figure 6.3 L'échelle de niveau d'encombrement perçu développée par (Kaber et al., 2008) a bien prédit l'encombrement global jugée par les participants ($r^2 = 0.723$).

6.2.2 Charge mentale de travail

La Figure 6.4 présente le niveau de charge mentale de travail moyen mesuré par NASA-TLX en fonction du niveau d'encombrement du PFD. La charge mentale ressentie avec l'écran ayant un encombrement faible a été de 12.78, alors que la charge mentale ressentie avec l'écran ayant un encombrement modéré a été de 10.10 et la charge mentale ressentie avec l'écran ayant un encombrement élevé a été de 13.91. L'effet du niveau d'encombrement du PFD sur la charge mentale de travail a été significatif ($F_{2,22} = 8.67, p < .005$).

Le test post-hoc de Tukey HSD a montré que la charge mentale ressentie avec le PFD ayant un encombrement modéré a été inférieure à celle obtenue avec l'écran ayant un encombrement faible ($p < .05$) et à celle obtenue avec l'écran ayant un encombrement élevé ($p < .005$). Il n'y a pas eu de différence de charge mentale entre les écrans ayant un encombrement faible et élevé.

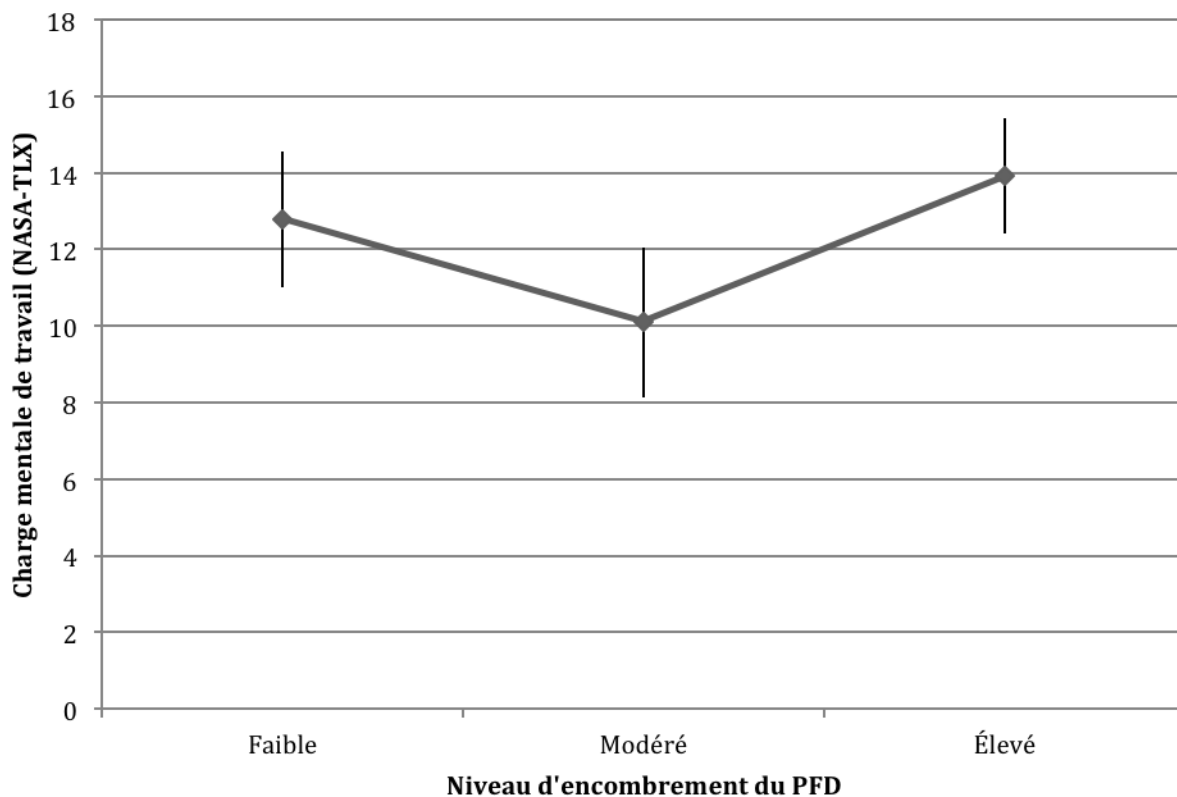


Figure 6.4 Charge mentale de travail mesurée avec le NASA-TLX en fonction du niveau d'encombrement de l'écran ($F_{2,22} = 8.67, p < .005$).

6.2.3 Qualités visuelles

La Figure 6.5 présente la qualité visuelle globale de l'écran en fonction du niveau d'encombrement du PFD. L'écran ayant un encombrement faible a eu un score de qualité visuelle globale de 9.41, l'écran ayant un encombrement modéré a eu un score de 12.43, et l'écran ayant un encombrement élevé a eu un score de 6.58. La différence de qualité visuelle globale en fonction du niveau d'encombrement du PFD a été fortement significative ($F_{2,22} = 22.60$, $p < .00001$). Le test post-hoc de Tukey HSD a montré que tous les scores de qualité visuelle globale sont significativement différents les uns des autres (tous les $ps < .01$).

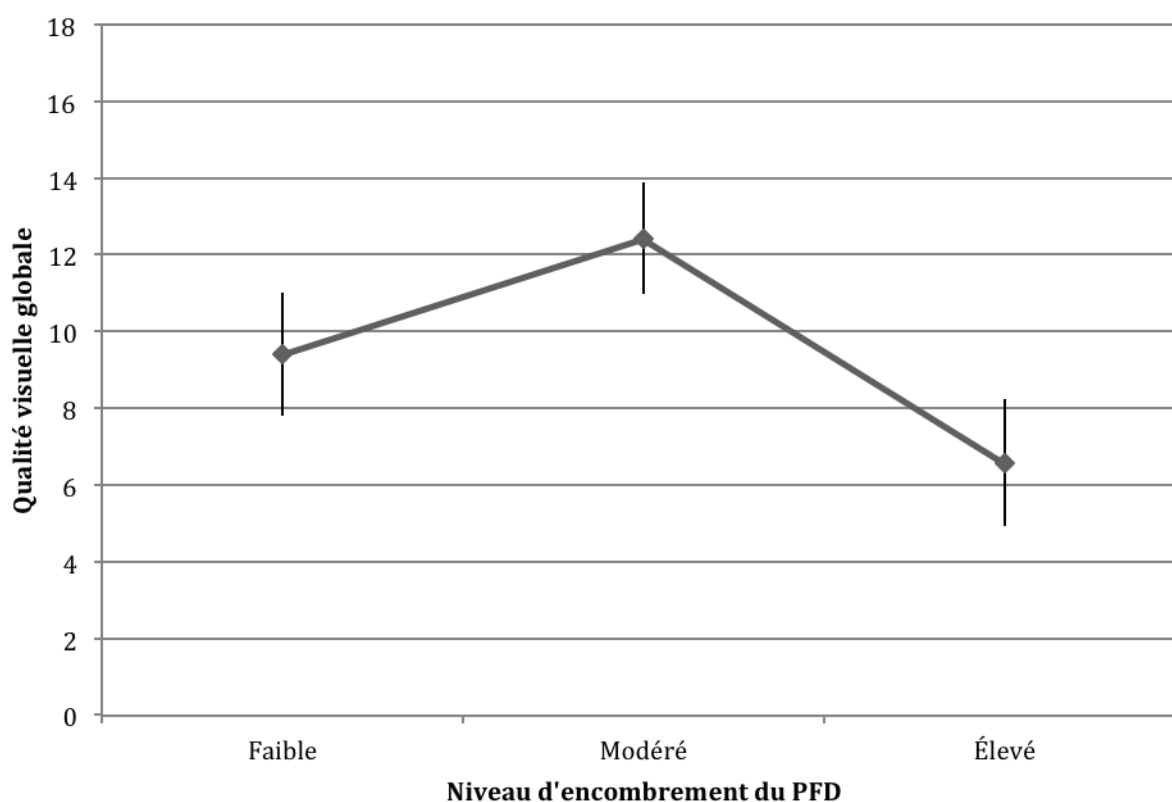


Figure 6.5 Qualité visuelle globale. Le PFD ayant un encombrement modéré a été perçu comme celui ayant la meilleure qualité visuelle ($F_{2,22} = 22.60$, $p < .00001$).

Le Tableau 6.2 présente la valeur moyenne pour les autres résultats de qualité visuelle des écrans. Ces résultats ont montré la même tendance que la qualité visuelle globale (Figure 6.5), où le PFD ayant un encombrement modéré a été perçu comme esthétiquement plus agréable que les autres. Tous ces résultats ont été statistiquement significatifs.

Il est intéressant de remarquer que le PFD ayant un encombrement faible a obtenu un score supérieur au PFD ayant un encombrement élevé pour toutes les mesures de qualité visuelle. Le test post-hoc de Tukey HSD a montré que la différence entre ces deux PFDs est significative pour toutes les mesures ($ps < .05$) à l'exception de la qualité expressive ($p > .10$).

Tableau 6.2 Résultats de la qualité visuelle en fonction du niveau d'encombrement du PFD.

Qualité visuelle	Niveau d'encombrement du PFD			Significatif?
	Faible	Modéré	Élevé	
Esthétique	5.50	14.00	2.50	$F_{2,22} = 33.87, p < .00001$
Classique	12.53	15.48	6.08	$F_{2,22} = 57.35, p < .00001$
Expressive	6.28	9.38	7.08	$F_{2,22} = 3.89, p < .05$
Globale	9.41	12.43	6.58	$F_{2,22} = 22.60, p < .00001$

6.2.4 Classement des écrans

Une fois tous les essais en vol complétés, les participants ont indiqué lequel des trois écrans a été le plus utile pour la tâche de vol, a offert la meilleure précision de vol, a été le plus encombré et a été le moins encombré. Le Tableau 6.3 présente la distribution des réponses des 12 pilotes. Nous avons utilisé le test de chi-carré (X^2) afin de comparer la distribution des réponses obtenues avec une distribution constante où chaque écran est choisi au hasard (c.-à-d. chaque écran a 4 réponses).

À la question « Lequel des écrans a été le plus utile pour la tâche de vol? », deux pilotes ont répondu que c'était l'écran ayant un encombrement faible, dix ont répondu que c'était l'écran ayant un encombrement modéré et aucun n'a répondu que c'était l'écran ayant un encombrement élevé. Le test de chi-carré a montré qu'une majorité de participants ont préféré l'écran ayant un encombrement modéré et que ce résultat a été significatif ($p < .001$). Les réponses à la question « Lequel des écrans a offert la meilleure précision de vol? » sont plus diversifiées, avec quatre pilotes choisissant l'écran ayant un encombrement faible, sept pilotes choisissant l'écran ayant un encombrement modéré et un pilote choisissant l'écran ayant un encombrement élevé. Bien que les résultats montrent qu'une majorité de participants ont considéré l'écran ayant un

encombrement modéré comme offrant la meilleure précision de vol, ce résultat n'a pas été significativement différent d'une distribution constante ($p > .10$). Sans surprise, tous les participants ont choisi l'écran ayant un encombrement élevé comme étant le plus encombré et ils ont fait de même pour l'écran ayant un encombrement faible comme étant le moins encombré. Ces deux résultats ont été fortement significatifs ($p < .000001$).

Tableau 6.3 Distribution des réponses des 12 pilotes pour l'identification des écrans.

Lequel des écrans a...	Niveau d'encombrement du PFD			Significatif?
	<i>Faible</i>	<i>Modéré</i>	<i>Élevé</i>	
été le plus utile pour la tâche de vol	2	10	0	$X^2(2, N=12) = 14.0, p < .001$
offert la meilleure précision de vol	4	7	1	$X^2(2, N=12) = 4.5, p > .10$
été le plus encombré	0	0	12	$X^2(2, N=12) = 24.0, p < .000001$
été le moins encombré	12	0	0	$X^2(2, N=12) = 24.0, p < .000001$

6.3 Performance technique de vol

Cette section présente les résultats de performance technique de vol durant l'approche. Pour chaque résultat, nous présentons s'il y a un effet de l'encombrement visuel, de l'étape de vol et de leur interaction sur la performance technique de vol. Le Tableau 6.4 présente la synthèse des tests statistiques pour les variables indépendantes de performance technique de vol. Le résultat de chaque variable indépendante est présenté en détail ci-dessous.

Tableau 6.4 Niveau de signification de l'effet de l'encombrement visuel, de l'étape de vol, et de l'interaction entre l'encombrement et l'étape de vol sur la performance technique de vol.

Variable	Encombrement	Étape de vol	Encombrement * étape de vol
Durée d'une étape de vol	ns	p = .005	ns
Déviations latérales moyennes	p < .05	ns	ns
Contrôle de la déviation latérale	p < .005	p < .005	ns
Déviations verticales moyennes	ns	ns	ns
Contrôle de la déviation verticale	ns	p < .01	ns
Activité moyenne du mini-manche en roulis	ns	p = .0005	ns
Contrôle de l'activité du mini-manche en roulis	ns	p = .001	ns
Activité moyenne du mini-manche en tangage	ns	ns	ns
Contrôle de l'activité du mini-manche en tangage	ns	ns	ns
Vitesse verticale moyenne	ns	p = .01	ns
Contrôle de la vitesse verticale	ns	p < .01	ns

6.3.1 Durée d'une étape de vol

La durée moyenne pour compléter les deux étapes de vol a été similaire entre les écrans, avec un temps de 77.0 secondes pour l'écran faiblement encombré, 82.4 secondes pour l'écran modérément encombré et 80.9 secondes pour l'écran encombré ($F_{2,22} = 3.08$, $p > .05$). Toutefois, un effet significatif a été observé entre les deux étapes de vol ($F_{1,11} = 11.62$, $p = .005$). Bien que la durée moyenne de chaque étape était semblable – 77.8 secondes pour l'approche initiale et 82.4 secondes pour l'approche finale – l'intervalle de confiance de l'approche finale a été le quart de celui de l'approche initiale (voir Figure 6.6). La plus grande variabilité de durée pour la première étape de vol s'explique par le profil de vitesse de l'avion : le pilote devait ralentir

l'appareil afin d'atteindre la vitesse d'approche finale en croisant le FAF. Le taux de décélération était laissé à la discrétion du pilote. Ce résultat servira à interpréter les résultats d'oculométrie utilisant une mesure proportionnelle au temps de la tâche.

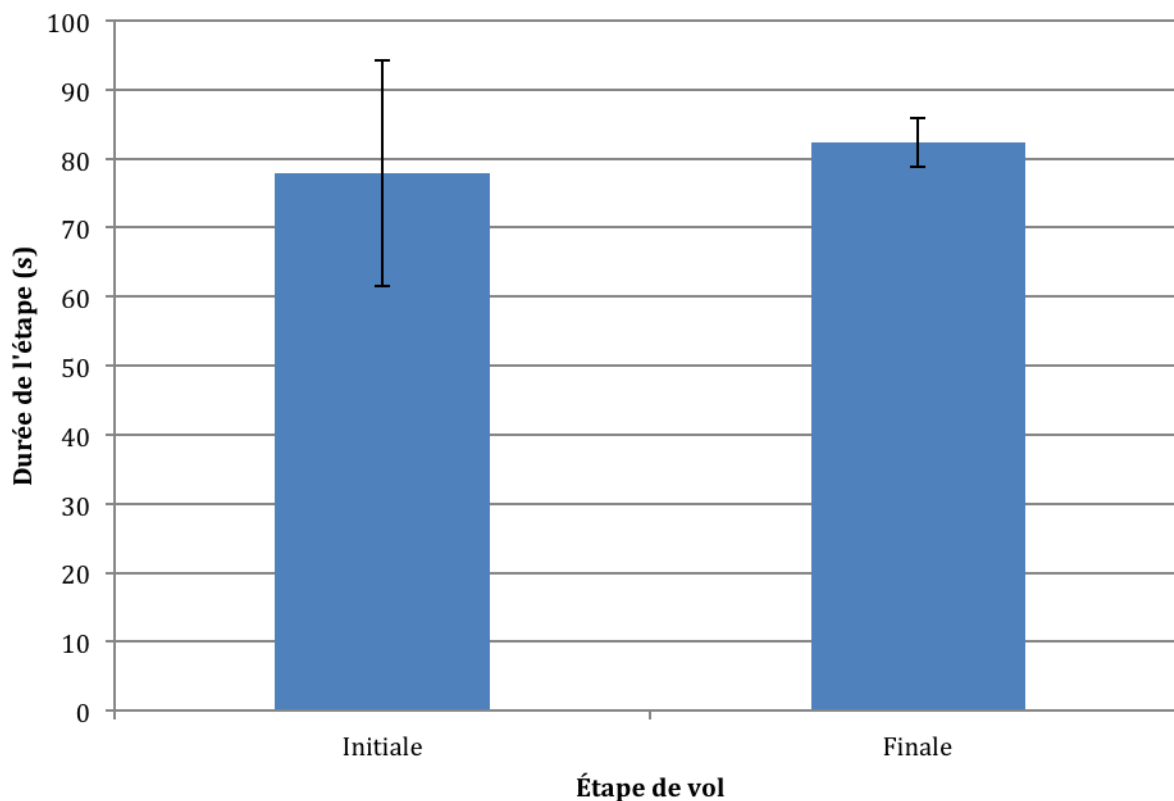


Figure 6.6 Durée moyenne pour compléter une étape de vol.

6.3.2 Déviation latérale moyenne – *Localizer*

La Figure 6.7 présente la déviation latérale moyenne, mesurée en points, pour les deux étapes de vol. Cette valeur est celle présentée par l'instrument de radiophare d'alignement de piste où une déviation de 0 point signifie que l'avion est parfaitement aligné avec la piste d'atterrissage. L'écran ayant un encombrement faible a eu une déviation latérale de 0.29 point, alors que la déviation a été de 0.21 point pour l'écran ayant un encombrement modéré et de 0.25 point pour l'écran ayant un encombrement élevé. L'effet de l'encombrement visuel sur la déviation latérale a été significatif ($F_{2,22} = 3.66$, $p < .05$). Le test post-hoc de Tukey HSD a montré que l'écran ayant un encombrement modéré a eu une déviation inférieure à l'écran ayant un encombrement faible ($p < .05$). Toutes les autres comparaisons n'ont pas été significatives (tous les $ps > .10$).

Il y a eu un effet marginalement significatif de l'étape de vol ($F_{1,11} = 3.65$, $p = .08$) indiquant que la déviation latérale moyenne à la première étape (0.23) a été inférieure à celle de l'étape finale (0.27). L'interaction entre l'étape de vol et l'encombrement visuel n'a pas été significative ($F_{2,22} = 0.18$, ns) indiquant que la tendance observée est la même pour les deux étapes de vol.

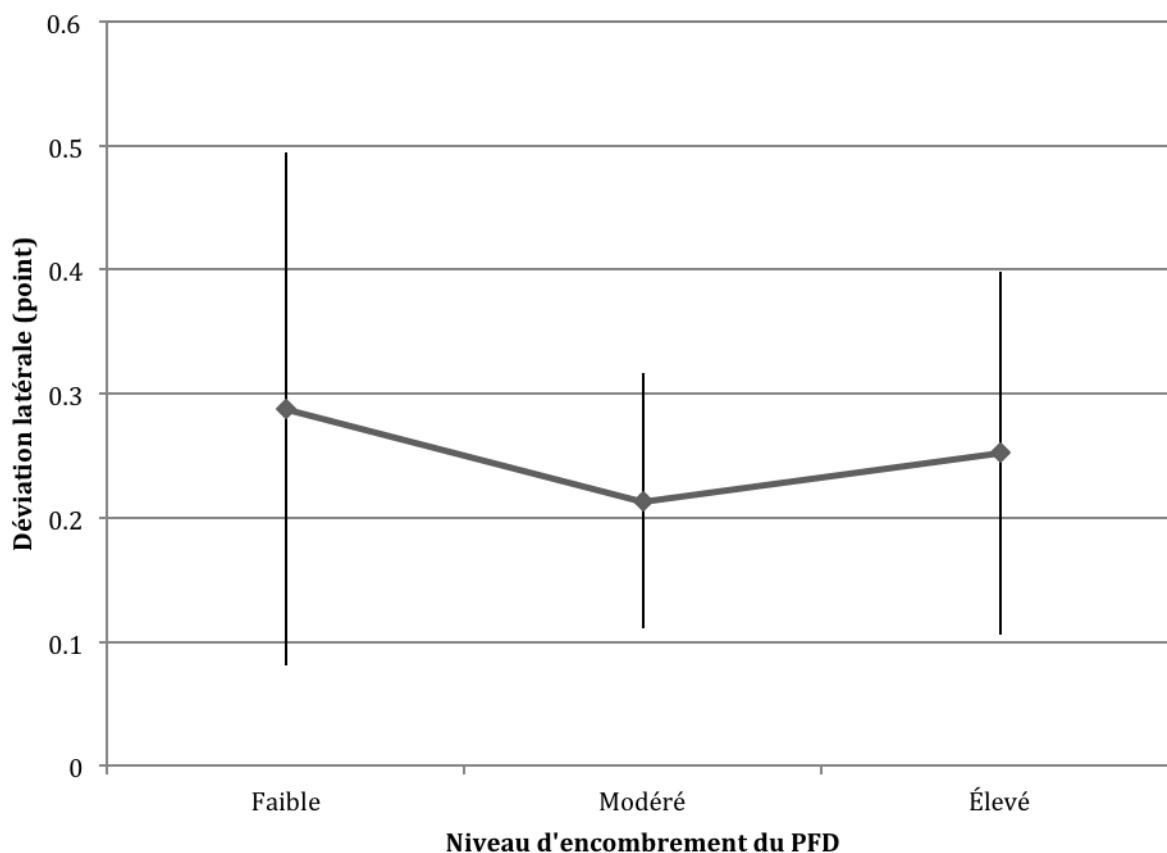


Figure 6.7 Déviation latérale moyenne en fonction du niveau d'encombrement du PFD.

6.3.3 Contrôle de la déviation latérale – *Localizer*

La Figure 6.8 présente le contrôle de la déviation latérale, mesurée en points, pour les deux étapes de vol. Cette valeur est une mesure de variation autour de la moyenne. L'écran ayant un encombrement faible a eu un contrôle de déviation latérale de 0.29 point, alors que le contrôle de la déviation latérale a été de 0.18 point pour l'écran ayant un encombrement modéré et de 0.21 point pour l'écran ayant un encombrement élevé. L'effet de l'encombrement visuel sur la déviation latérale a été significatif ($F_{2,22} = 7.84$, $p < .005$). Le test post-hoc de Tukey HSD a montré que l'écran ayant un encombrement faible a une valeur supérieure (indiquant une

variation supérieure de la déviation latérale) que les écrans ayant un encombrement modéré ($p < .005$) et élevé ($p < .05$). La comparaison entre les écrans ayant un encombrement modéré et élevé n'a pas été significative ($p > .10$).

Il y a eu un effet significatif de l'étape de vol ($F_{1,11} = 15.32, p < .005$) indiquant que le contrôle de la déviation latérale moyenne a été meilleur lors de la première étape (0.20) que lors de l'étape finale (0.26). L'interaction entre l'étape de vol et l'encombrement visuel n'a pas été significative ($F_{2,22} = 0.23, ns$).

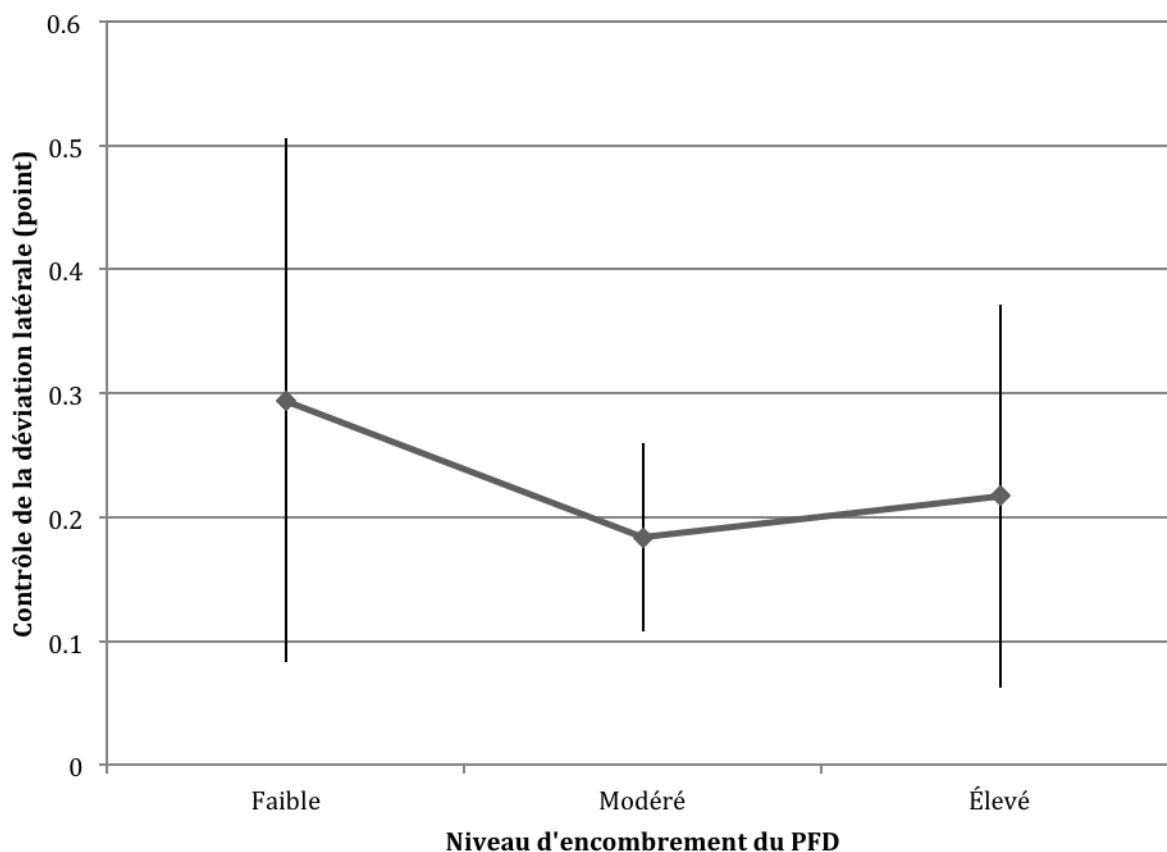


Figure 6.8 L'écran ayant un encombrement modéré a permis un meilleur contrôle de la déviation latérale durant l'approche que les deux autres écrans ($F_{2,22} = 7.84, p < .005$).

6.3.4 Déviation verticale moyenne – *Glideslope*

La Figure 6.9 présente la déviation verticale moyenne en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Cette valeur est celle présentée par l'instrument d'alignement de descente où une déviation de 0 point signifie que l'avion suit parfaitement un vecteur de descente de 3° vers la piste. Tous

les écrans ont eu une déviation de 0.52 point. Il n'y a eu aucun effet de l'encombrement visuel sur la déviation verticale moyenne ($F_{2,22} = 0.0$, *ns*). La Figure 6.9 montre que les barres d'incertitude sont grandes, signifiant une variation importante entre les participants pour un même écran. Aucun effet de l'étape de vol n'a été observé sur la déviation verticale ($F_{1,11} = 0.19$, *ns*).

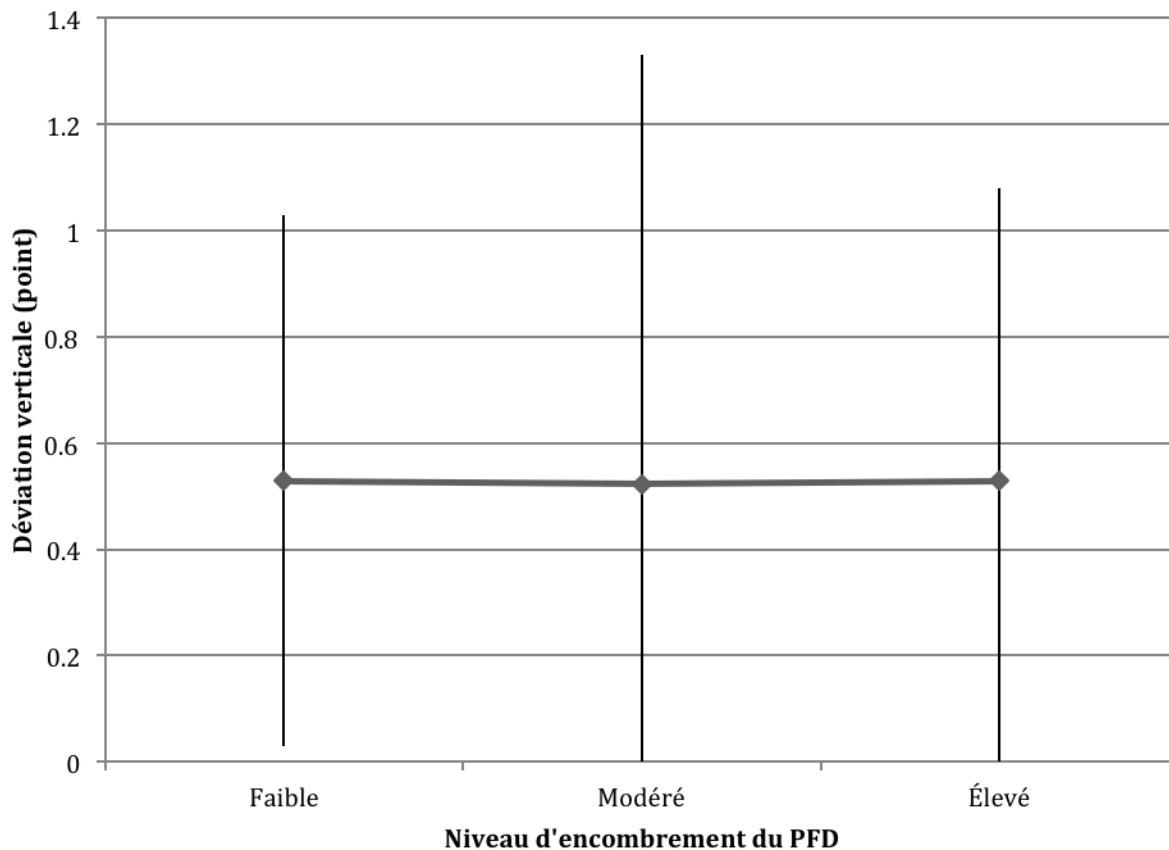


Figure 6.9 La déviation verticale moyenne est la même pour tous les niveaux d'encombrement de PFD. Notez la taille des barres d'incertitude, signifiant une variation importante entre les participants.

6.3.5 Contrôle de la déviation verticale – *Glideslope*

La Figure 6.10 présente le contrôle de la déviation verticale, mesurée en points, pour les deux étapes de vol. L'écran ayant un encombrement faible a eu un contrôle de 0.36 point, alors que le contrôle a été de 0.34 point pour l'écran ayant un encombrement modéré et de 0.33 point pour l'écran ayant un encombrement élevé. Il n'y a pas eu d'effet du niveau d'encombrement sur le

contrôle de la déviation verticale ($F_{2,22} = 0.36$, *ns*). Il y a eu un effet de l'étape de vol sur le contrôle de la déviation latérale ($F_{1,11} = 11.04$, $p < .01$). La première étape a eu un meilleur contrôle (0.29 point) que l'étape finale (0.39 point), indiquant que les pilotes ont réalisé plus d'ajustements sur le taux de descente durant l'étape finale du vol. L'interaction entre le niveau d'encombrement et l'étape de vol n'a pas été significative ($F_{2,22} = 0.45$, *ns*).

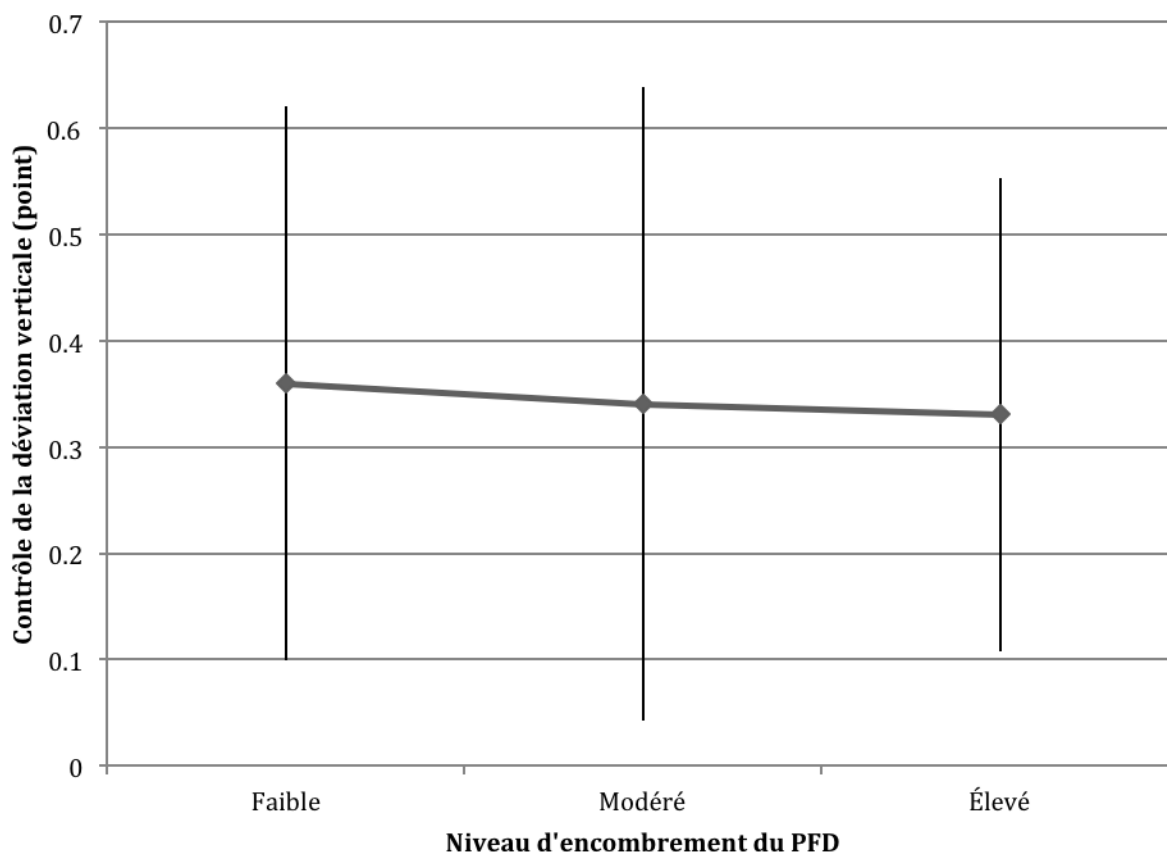


Figure 6.10 Contrôle de la déviation verticale en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. L'effet de l'encombrement n'a pas été significatif ($F_{2,22} = 0.36$, *ns*)

6.3.6 Activité du mini-manche en roulis

Les résultats montrant un effet de l'encombrement visuel sur la déviation latérale moyenne et le contrôle de la déviation latérale de l'avion suggèrent une activité accrue du mini-manche sur l'axe de roulis pour contrôler l'approche. La Figure 6.11 présente l'inclinaison moyenne, mesurée en degrés, du mini-manche sur l'axe de roulis. Une inclinaison nulle signifie que la position du manche a été au neutre durant l'approche et que le pilote n'a réalisé aucune commande de roulis.

La Figure 6.11 montre une tendance où l'écran ayant un encombrement modéré a eu une commande de roulis inférieure (moyenne de 0.82°) que les écrans ayant un encombrement faible (1.10°) et élevé (1.06°). Toutefois, cette différence n'a pas été significative ($F_{2,22} = 2.43, p > .10$). Il y a eu un effet de l'étape de vol ($F_{1,11} = 23.22, p = .0005$) indiquant que les pilotes ont réalisé plus de commandes durant l'étape finale de l'approche (moyenne de 1.12°) que durant la première étape (0.86°). L'interaction entre le niveau d'encombrement et l'étape de vol n'a pas été significative ($F_{2,22} = 1.73, p > .10$).

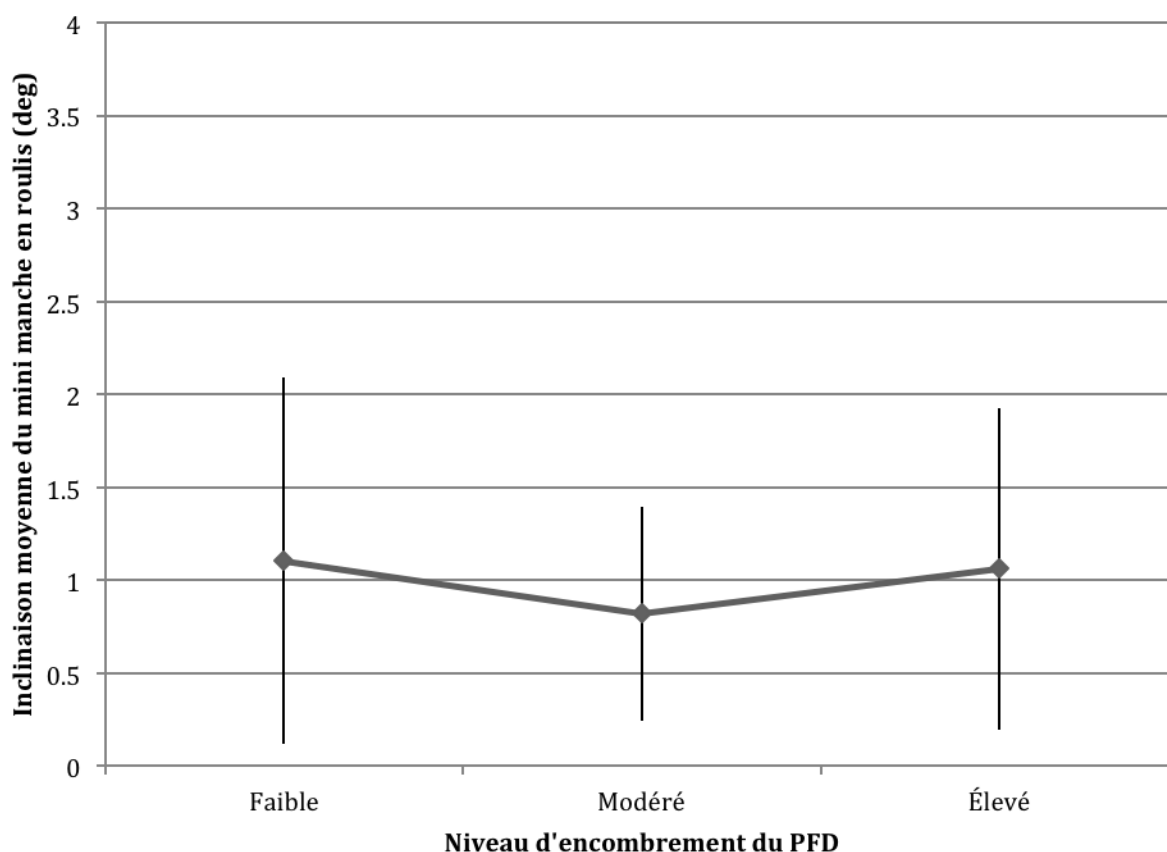


Figure 6.11 Inclinaison moyenne du mini-manche sur l'axe de roulis (en degrés) en fonction du niveau d'encombrement de l'écran.

Le contrôle de l'inclinaison en roulis a suivi la même tendance que l'inclinaison moyenne. La Figure 6.12 présente le contrôle de l'inclinaison du mini-manche sur l'axe de roulis, mesuré en degré, en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. Le contrôle en roulis a été de 2.00° pour les écrans ayant un encombrement faible et élevé, alors qu'il a été de 1.60° pour l'écran ayant un encombrement modéré. La différence observée entre les écrans n'est pas significative

($F_{2,22} = 2.26, p > .10$). La valeur du contrôle de l'inclinaison (Figure 6.12) a été près du double de la valeur de l'inclinaison moyenne (Figure 6.11), indiquant une activité notable du mini-manche autour de la valeur moyenne. Il y a eu un effet de l'étape de vol sur le contrôle de l'inclinaison du mini-manche sur l'axe de roulis ($F_{1,11} = 17.96, p = .001$) indiquant que les pilotes ont réalisé plus de corrections sur l'axe de roulis durant l'étape finale de l'approche (moyenne de 2.05°) que durant la première étape (1.69°). L'interaction entre le niveau d'encombrement et l'étape de vol n'a pas été significative ($F_{2,22} = 2.59, p = .10$).

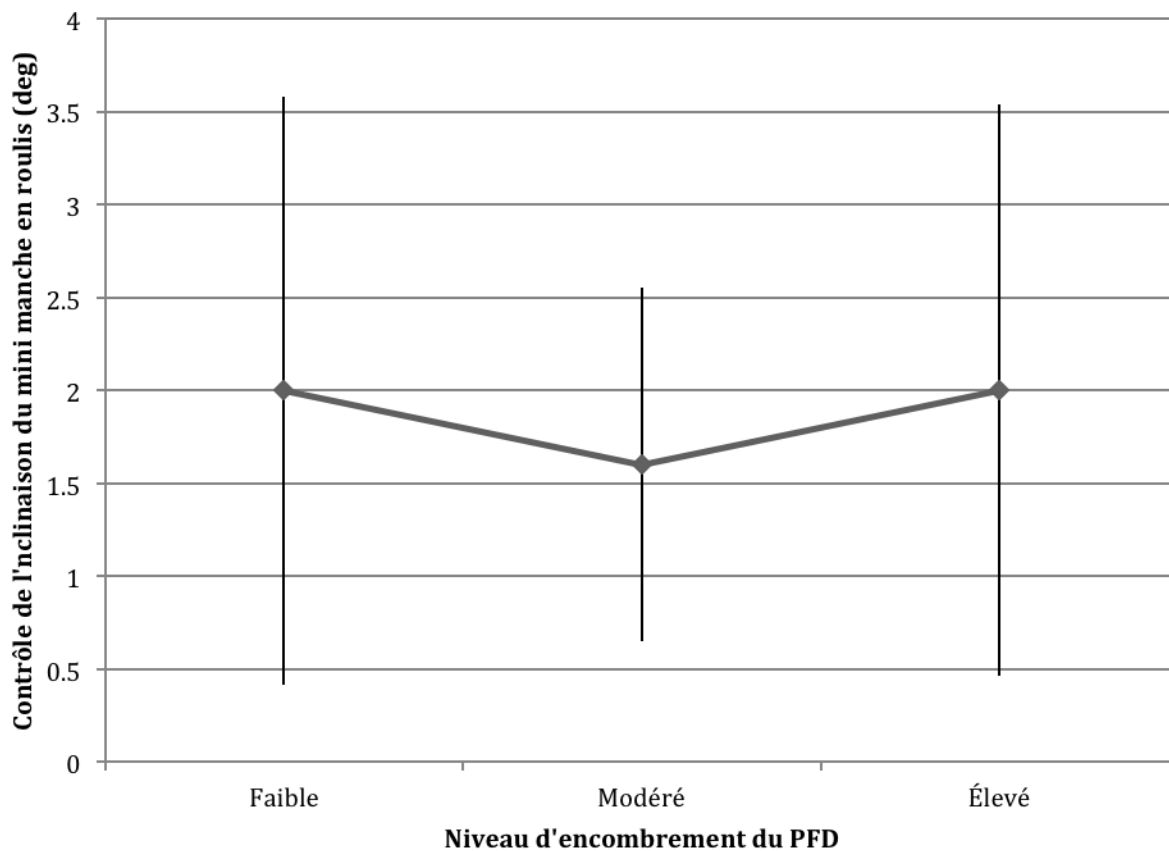


Figure 6.12 Contrôle de l'inclinaison du mini-manche sur l'axe de roulis (en degrés) en fonction du niveau d'encombrement de l'écran.

6.3.7 Activité du mini-manche en tangage

Il n'y a eu aucun effet de l'encombrement visuel sur l'inclinaison moyenne du mini-manche sur l'axe de tangage ($F_{2,22} = 0.85, ns$), ni sur le contrôle de l'inclinaison sur l'axe de tangage ($F_{2,22} = 1.81, p > .10$). Il n'y a eu aucun effet de l'étape de vol sur l'inclinaison moyenne ($F_{1,11} = 0.43,$

ns), ni sur le contrôle de l'inclinaison ($F_{1,11} = 0.0$, *ns*). Conséquemment, ce résultat ne sera pas discuté plus en profondeur.

6.3.8 Vitesse verticale moyenne

La Figure 6.13 présente la vitesse verticale moyenne, mesurée en pieds par minute, en fonction du niveau d'encombrement du PFD. La vitesse verticale a été similaire pour les trois écrans, avec une valeur de 658 pieds/minute pour l'écran ayant un encombrement faible, de 620 pieds/minute pour l'écran ayant un encombrement modéré et de 646 pieds*minute pour l'écran ayant un encombrement élevé. La différence observée entre les niveaux d'encombrement n'a pas été significative ($F_{2,22} = 1.20$, $p > .10$). Le pilote contrôle le taux de descente avec la vitesse verticale de l'appareil. L'absence de différence pour ce résultat est donc consistante avec le résultat précédent de la déviation verticale semblable entre les écrans. Il y a eu un effet de l'étape de vol sur la vitesse verticale moyenne ($F_{1,11} = 9.25$, $p = .01$), avec la première étape ayant une vitesse supérieure (679 pieds/minute) à l'étape finale (603 pieds/minute). Ce résultat est lié au fait que l'avion était encore en décélération durant la première étape de l'approche²³. L'interaction entre le niveau d'encombrement et l'étape de vol n'a pas été significative ($F_{2,22} = 0.0$, *ns*).

²³ Afin de suivre un vecteur de descente de 3°, la vitesse verticale est proportionnelle à la vitesse indiquée de l'avion. Pour rappel, l'avion devait être configuré pour l'atterrissage, et donc avoir sa vitesse d'approche, en croisant le point d'approche final. Le point d'approche final se situait au début de la deuxième étape de vol.

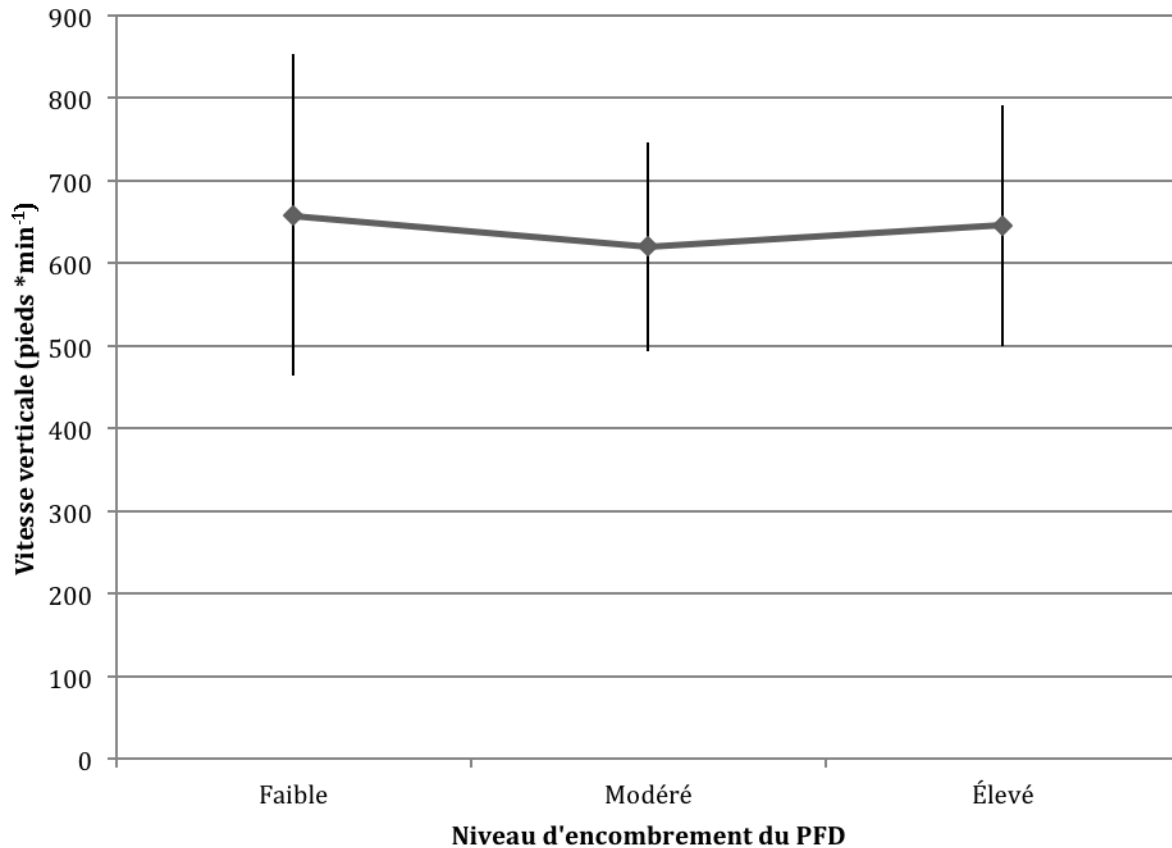


Figure 6.13 Vitesse verticale moyenne en fonction du niveau d'encombrement de l'écran.

6.3.9 Contrôle de la vitesse verticale

La Figure 6.14 présente le contrôle de la vitesse verticale, mesurée en pieds par minute, en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. Le contrôle de la vitesse verticale a été similaire entre les écrans, avec une valeur de 221 pieds/minute pour l'écran ayant un encombrement faible, 244 pieds/minute pour l'écran ayant un encombrement modéré et 234 pieds/minute pour l'écran ayant un encombrement élevé. La différence observée n'est pas significative ($F_{2,22} = 0.63$, *ns*). Il y a eu un effet significatif de l'étape de vol ($F_{1,11} = 10.58$, $p < .01$), indiquant une plus grande variation dans le contrôle de la vitesse verticale pour la première étape de vol (264 pieds/minute) que pour l'étape finale (202 pieds/minute). Comme pour la vitesse verticale moyenne, cette différence reflète que l'avion avait une vitesse supérieure durant la première étape de vol et était en décélération.

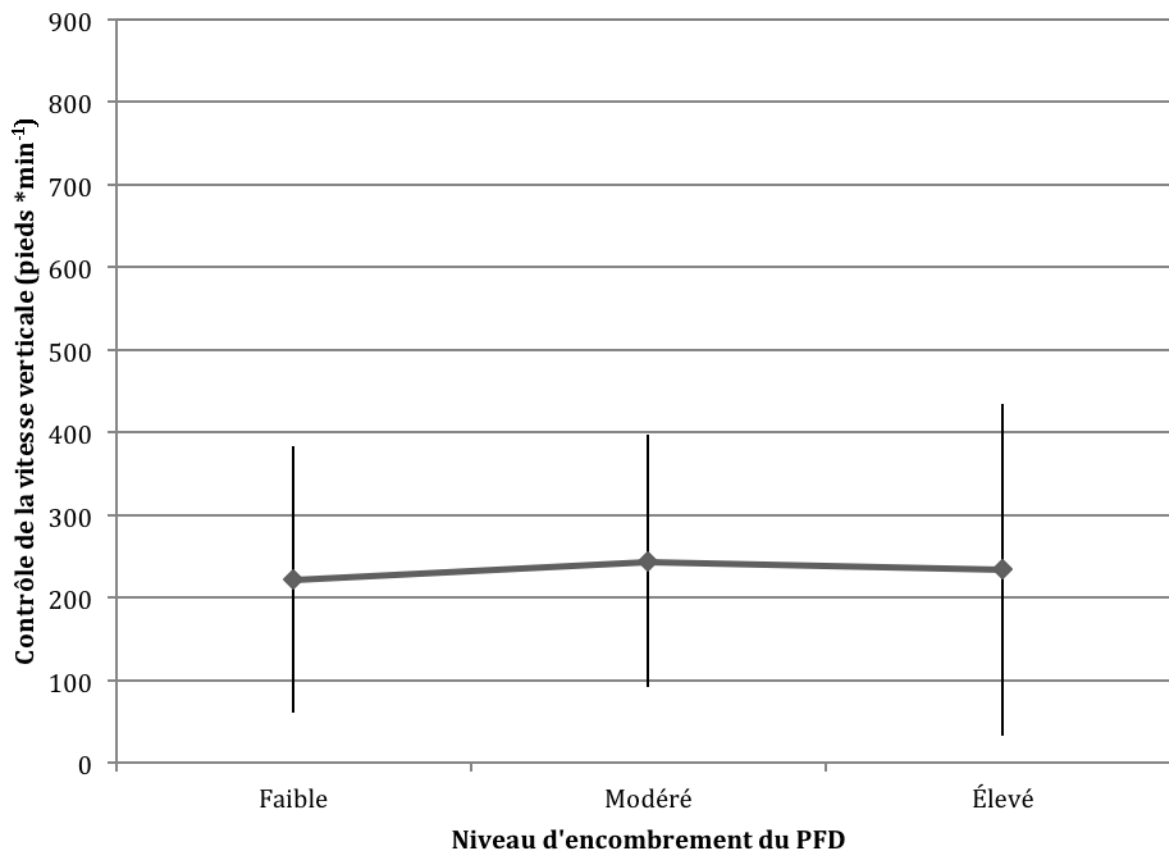


Figure 6.14 Contrôle de la vitesse verticale en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. Aucune différence significative n'a été observée entre les écrans.

6.4 Parcours visuel

Cette section présente les résultats de parcours visuel obtenus à partir des données d'oculométrie. Comme nous l'avons expliqué au chapitre de méthode, nous avons conservé les résultats de quatre participants pour l'analyse.

6.4.1 Visualisation du parcours visuel

Le Tableau 6.5 présente le nombre de couples de points (x,y) de la position du regard utilisés pour construire la carte de visualisation pour chaque affichage. Celui-ci représente la position du regard de tous les participants durant les deux étapes de vol pour les trois répétitions réalisées. La différence entre les conditions s'explique par la durée plus courte pour compléter l'approche avec l'écran encombré et le fait qu'il a manqué un fichier de données pour l'écran faiblement

encombré. Notons que la carte de visualisation a été normalisée pour chaque écran, c'est-à-dire que le maximum observé sur une carte ne correspond pas au même nombre d'observations du maximum d'une autre carte.

Tableau 6.5 Nombre de couples de points utilisés pour construire la carte de visualisation du parcours visuel des trois PFDs.

Niveau d'encombrement du PFD	Couples de points
Faible	113 914
Modéré	129 103
Élevé	122 614

Les cartes de visualisation pour les trois PFDs sont présentées de la Figure 6.15 à la Figure 6.17. La position du regard sur les trois écrans montre le même patron en T typique de l'observation des instruments de vol par les pilotes. Le centre de l'horizon artificiel a attiré le plus de temps d'observation; c'est la position de base du regard du pilote. De là, le pilote réalise une saccade pour poser son regard sur les instruments de vol pertinents à son approche avant de revenir à nouveau sur le centre de l'horizon artificiel. L'écran ayant un faible encombrement (voir Figure 6.15) montre que les participants ont dirigé leur regard de manière sélective vers les indicateurs de vol sans réaliser de saccade inutile à l'extérieur des instruments. Il faut dire que la simplicité graphique de l'interface a limité les possibilités de distraction à l'extérieur des instruments. De plus, on remarque que les participants ont peu regardé l'indicateur de vitesse et celui d'altitude, concentrant leur attention visuelle sur les indicateurs de déviation latérale et verticale. En effet, ces deux instruments donnent la fonction de guidage, et donc, renseignent sur la précision de l'approche.

Le patron du regard pour l'écran modérément encombré (voir Figure 6.16) montre que le pilote a élargi son parcours visuel pour réaliser des saccades sur le sélecteur de vitesse, d'altitude et de cap, des instruments absents de l'écran faiblement encombré. La majorité des saccades est toutefois réalisée sur les instruments de vol pertinents à l'approche, soit les indicateurs de déviation latérale et verticale.

Le patron du regard de l'écran encombré (voir Figure 6.17) présente un patron en T plus diffus que pour les deux autres écrans. La majorité du regard est concentré sur le centre de l'horizon artificiel. Les indicateurs de déviation ont attiré une moins grande proportion du temps d'observation que pour les deux autres affichages, comme le dénote la couleur cyan superposé à ces indicateurs. Si les participants ont été distraits par le panneau d'instrumentation d'ingénierie, le temps d'observations de ce panneau a été faible proportionnellement au temps d'observation de l'horizon artificiel car la carte montre cette région d'un bleu foncé.

Après cette analyse qualitative du parcours visuel, nous présentons les résultats quantitatifs du parcours visuel enregistré par l'oculomètre.

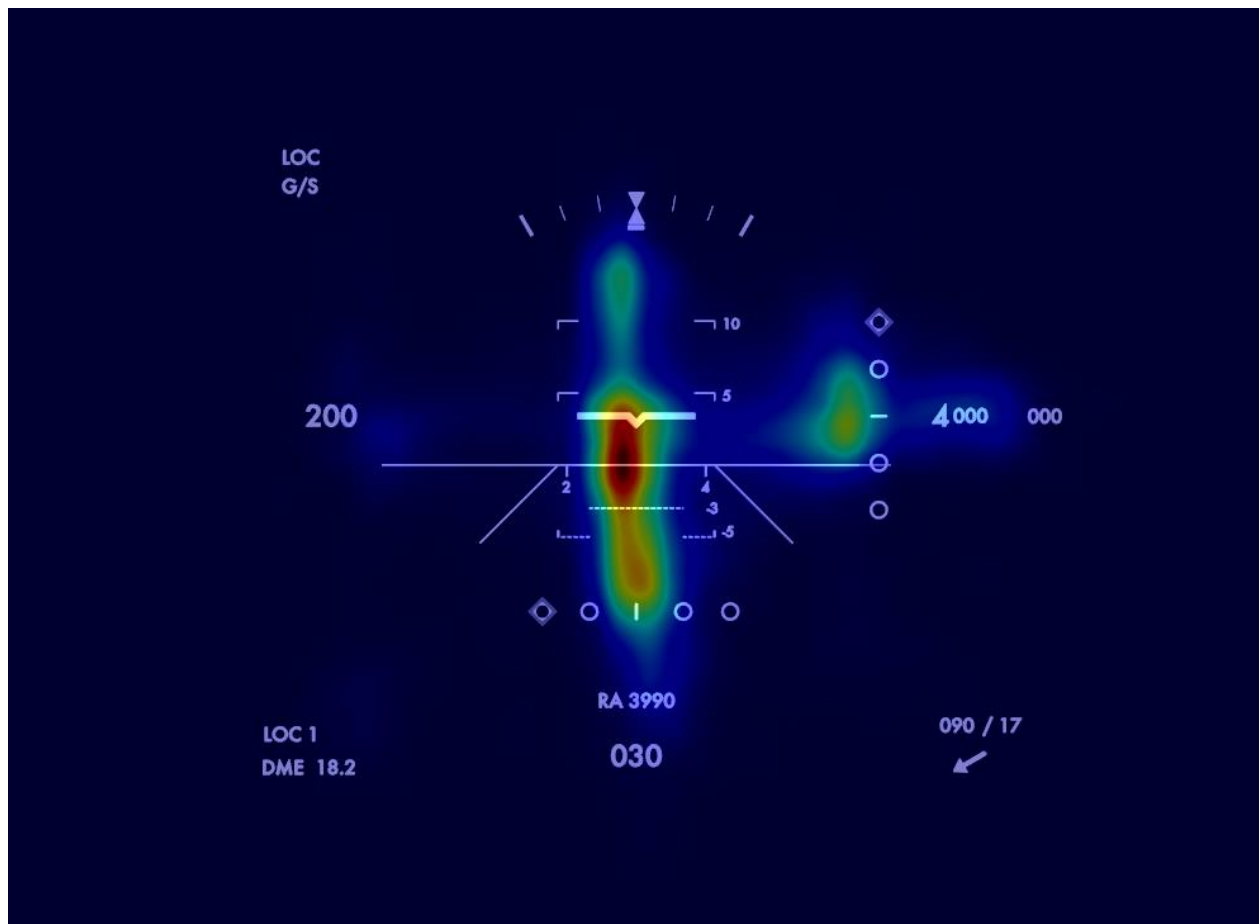


Figure 6.15 Carte de visualisation du regard des participants utilisant l'écran faiblement encombré durant les deux étapes de vol.

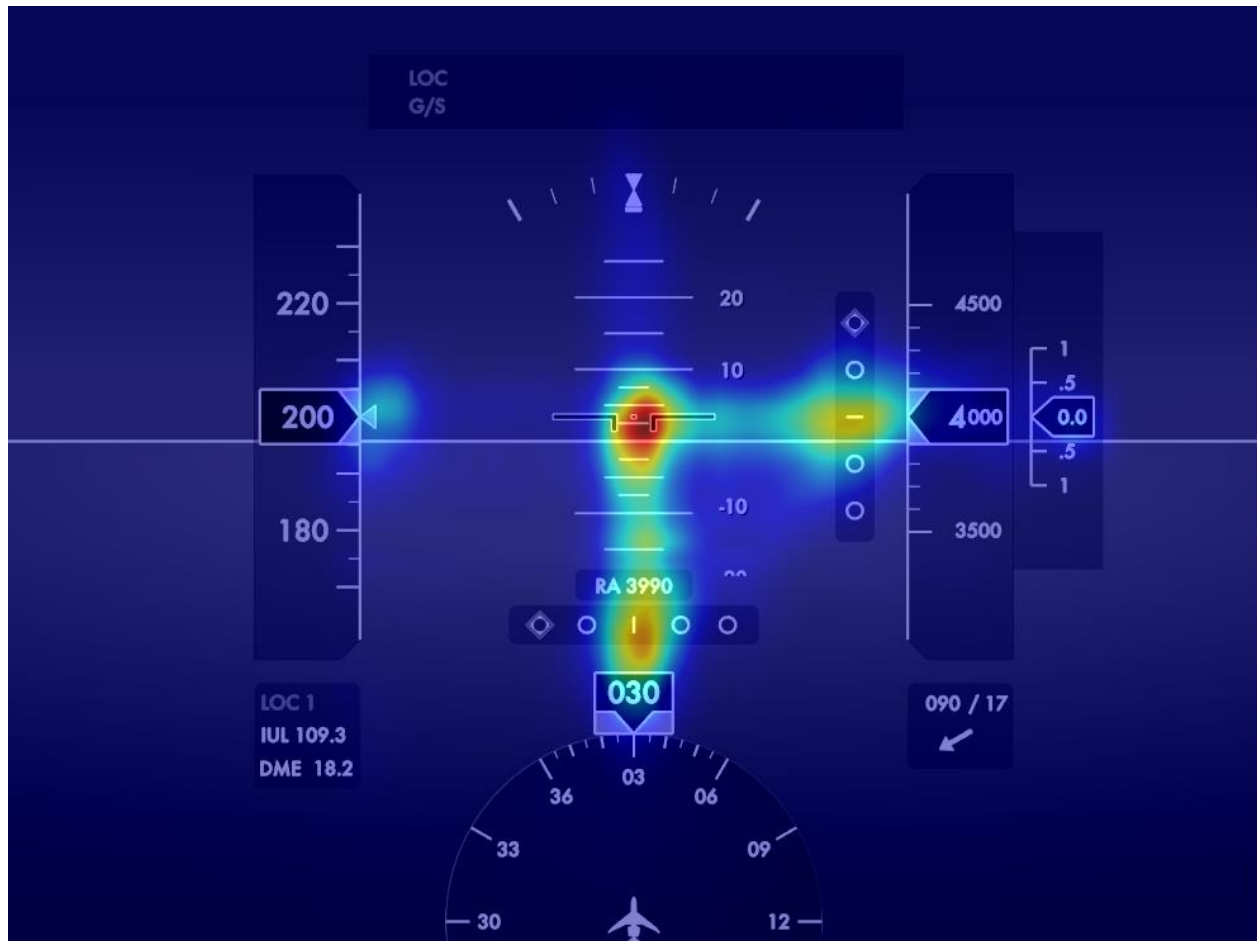


Figure 6.16 Carte de visualisation du regard des participants utilisant l'écran modérément encombré durant les deux étapes de vol.

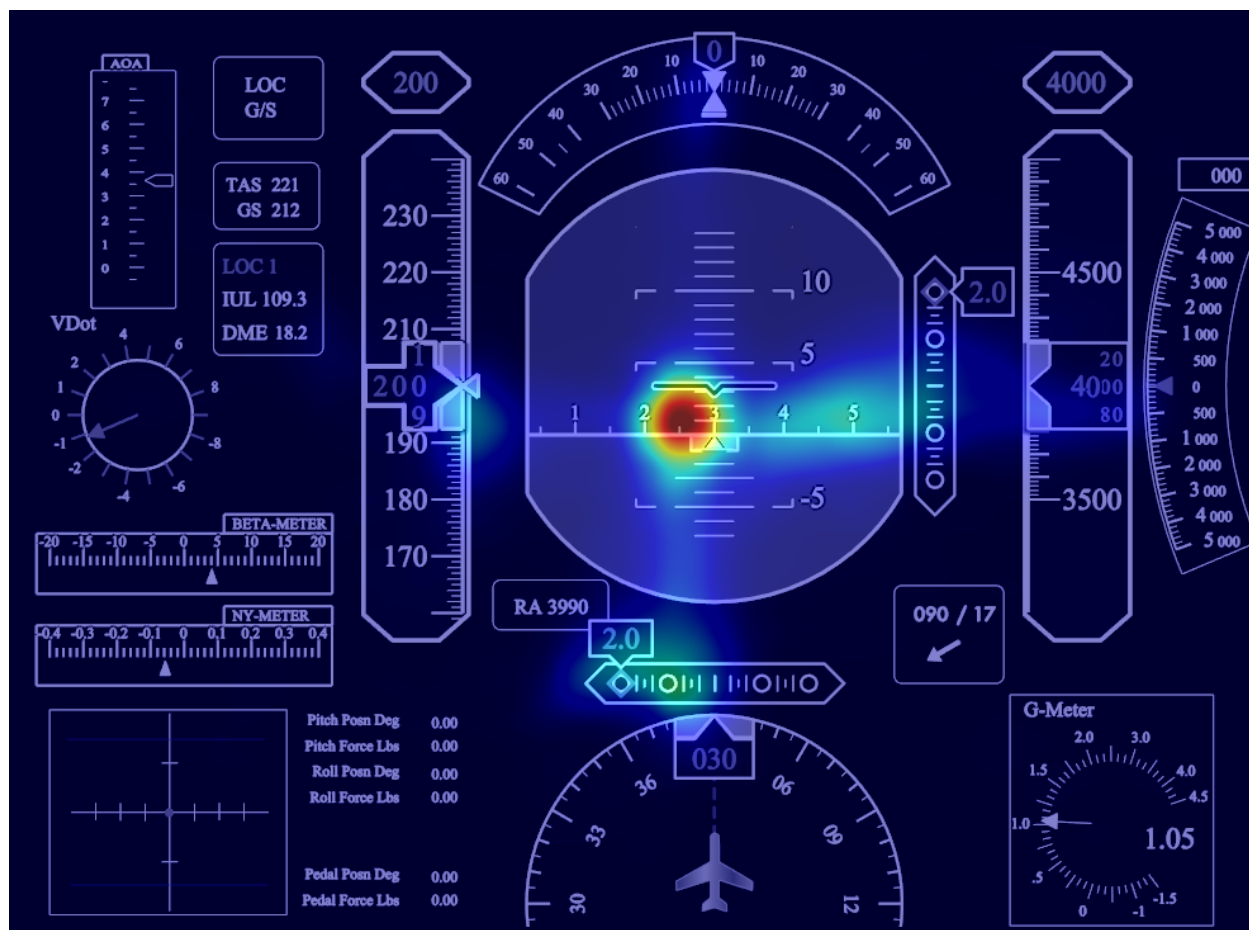


Figure 6.17 Carte de visualisation du regard des participants utilisant l'écran encombré durant les deux étapes de vol. Le code de couleur indique que les participants ont moins observé les indicateurs de déviation latérale et verticale que pour les autres écrans.

6.4.2 Durée d'une fixation

La Figure 6.18 présente la durée moyenne d'une fixation à l'écran pour les deux étapes de vol, en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. On remarque que la durée d'une fixation a été semblable entre les trois écrans pour la première étape de vol (de 455 à 485ms), alors que la discrimination entre les écrans a augmenté durant la seconde étape de vol. Dans ce cas, la durée d'une fixation a été la plus longue pour l'écran avec un encombrement modéré, soit 555ms, alors qu'elle a été respectivement de 476ms et 483ms pour les écrans ayant un encombrement faible et élevé. Il s'agit d'une différence de 15% entre les valeurs maximale et minimale.

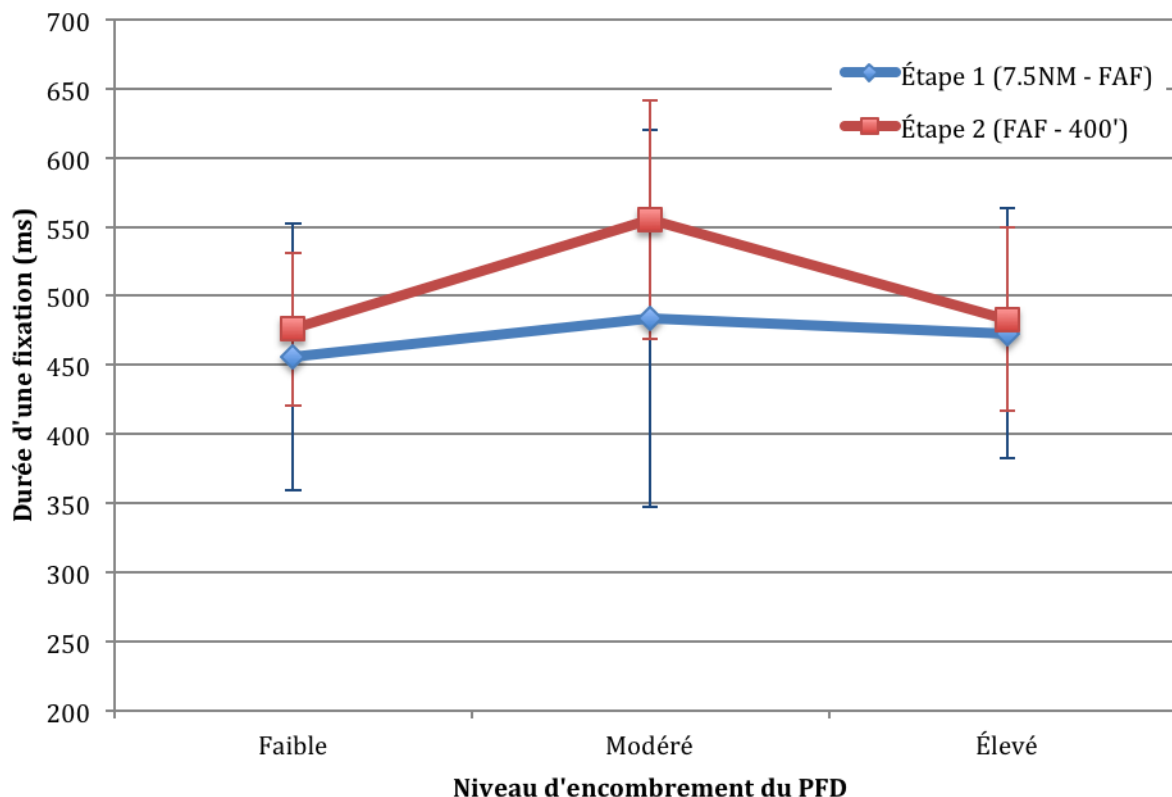


Figure 6.18 Durée moyenne d'une fixation en fonction du niveau d'encombrement de l'écran. On remarque que la différence entre les écrans a été plus importante pour la seconde étape de vol.

6.4.3 Longueur d'une saccade

La Figure 6.19 présente la longueur moyenne d'une saccade en fonction du niveau d'encombrement. Nous avons observé la même tendance entre les deux étapes de vol, c'est pourquoi la figure présente la moyenne de la longueur d'une saccade des deux étapes de vol. La longueur d'une saccade a été la même pour l'écran ayant un faible encombrement (147 pixels) et un encombrement modéré (146 pixels). Elle a été de 169 pixels pour l'écran ayant un encombrement élevé, soit une différence de 15%. Les saccades plus longues pour l'écran ayant un encombrement élevé indiquent que les participants ont du parcourir une plus grande distance du regard pour obtenir l'information nécessaire pour leur tâche comparativement aux écrans moins encombrés.

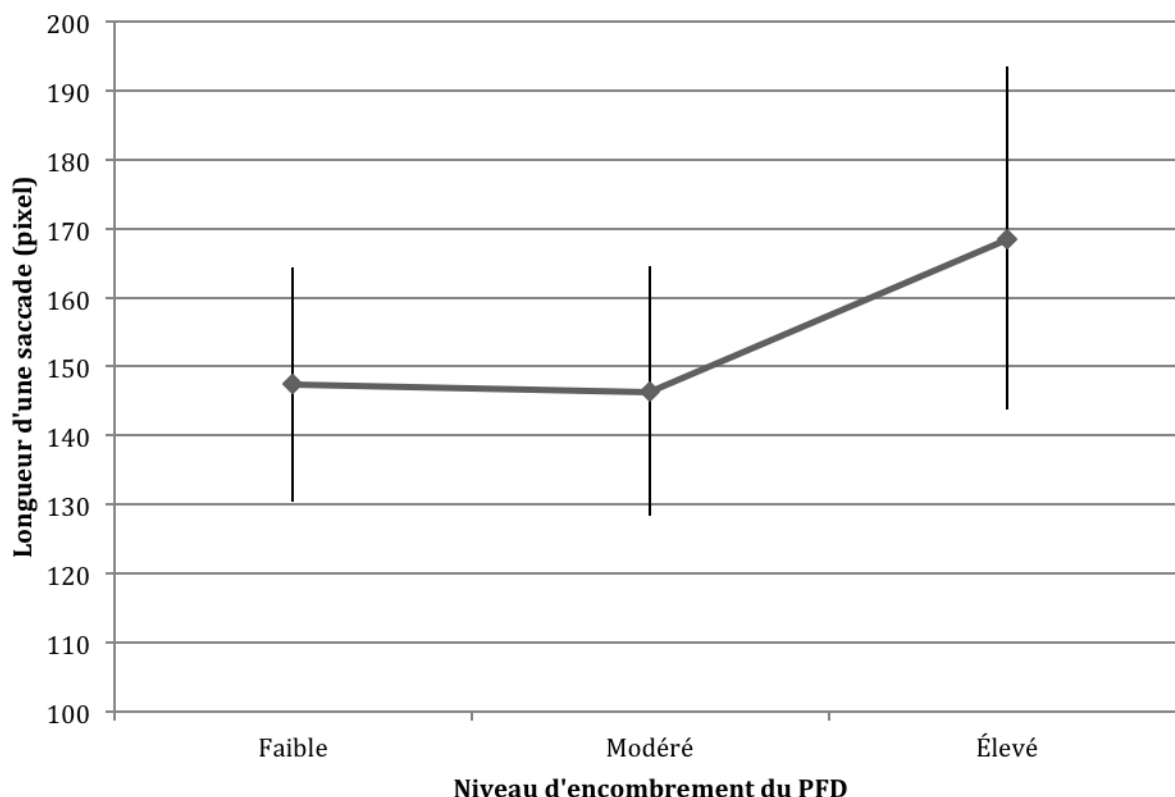


Figure 6.19 Longueur moyenne d'une saccade. Celle-ci a été la plus longue pour l'écran ayant un encombrement élevé. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.

6.4.4 Nombre de transitions (grille 14 x 10)

La Figure 6.20 présente le nombre de transitions d'une zone à l'autre de l'écran en utilisant une grille uniforme de 14 x 10 zones. Nous avons calculé le nombre de transitions en utilisant les fixations à l'écran. Le niveau d'encombrement de l'écran n'a pas influencé le nombre de transition entre les zones, celui-ci variant de moins de 1% entre les écrans. L'étape de vol a montré un effet clair sur le nombre de transitions. Les participants ont réalisé 147 transitions durant la première étape, alors que ce nombre diminue à 105 transitions durant la seconde étape. Cette différence s'explique essentiellement par la durée plus longue de la première étape de vol (108 ± 20 secondes) comparativement à la deuxième étape (78 ± 17 secondes) pour le sous-échantillon de participants (voir aussi §6.3.1). Toutefois, le ratio de nombre de transitions divisé par la durée de l'étape de vol a donné un résultat semblable entre les deux étapes, soit de 1.4 ± 0.2 transition/sec pour la première étape et 1.3 ± 0.2 pour la deuxième étape.

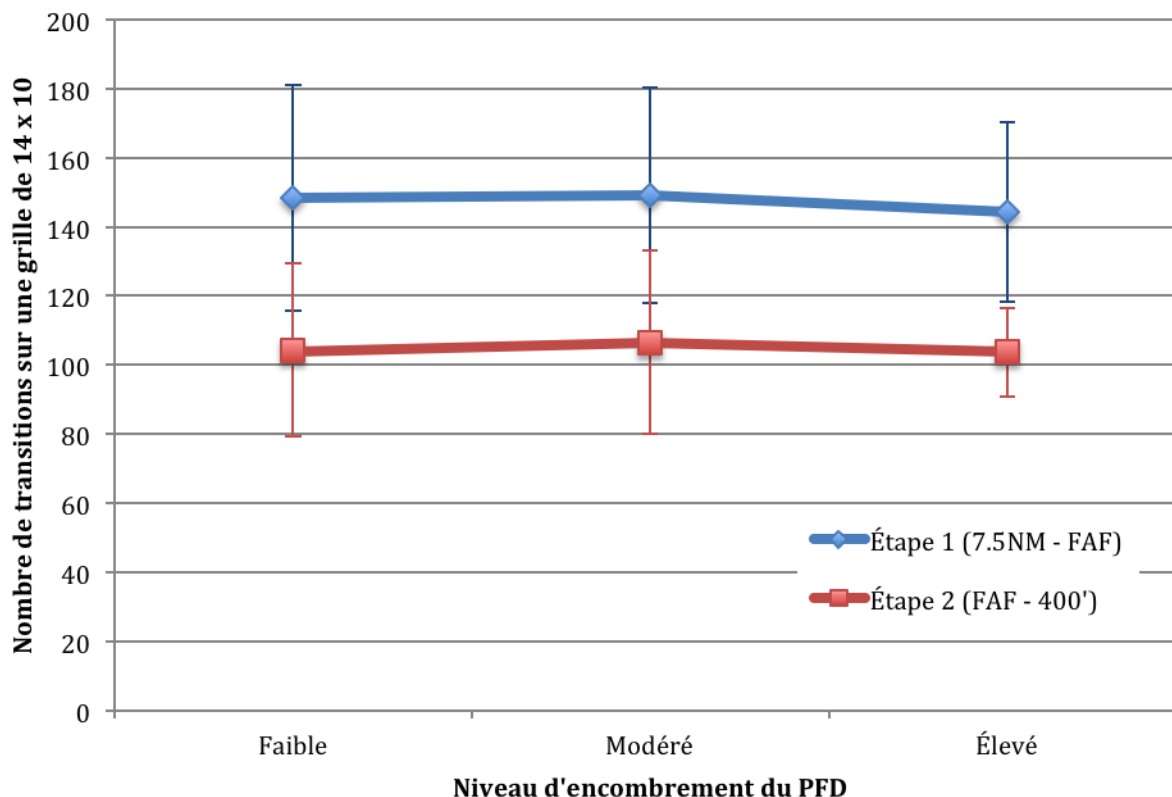


Figure 6.20 Nombre de transitions des fixations d'une zone de l'écran à une autre en appliquant une grille de 14 x 10 zones. Le niveau d'encombrement n'a pas influencé le nombre de transitions.

6.4.5 Surface convexe couverte par les fixations

La surface convexe couverte par les fixations est une indication de la taille du foyer d'attention visuel du participant et de la superficie de l'écran que le participant a regardé. La Figure 6.21 présente une vue de la surface convexe délimitée par un trait rouge en y superposant les points de fixation du participant 9. On y voit que la surface des fixations est plus grande pour l'écran encombré (Figure 6.21, en bas) que pour l'écran avec un faible encombrement (Figure 6.21, en haut) car le participant a posé son regard sur les instruments du panneau d'ingénierie situé en périphérie de l'écran.

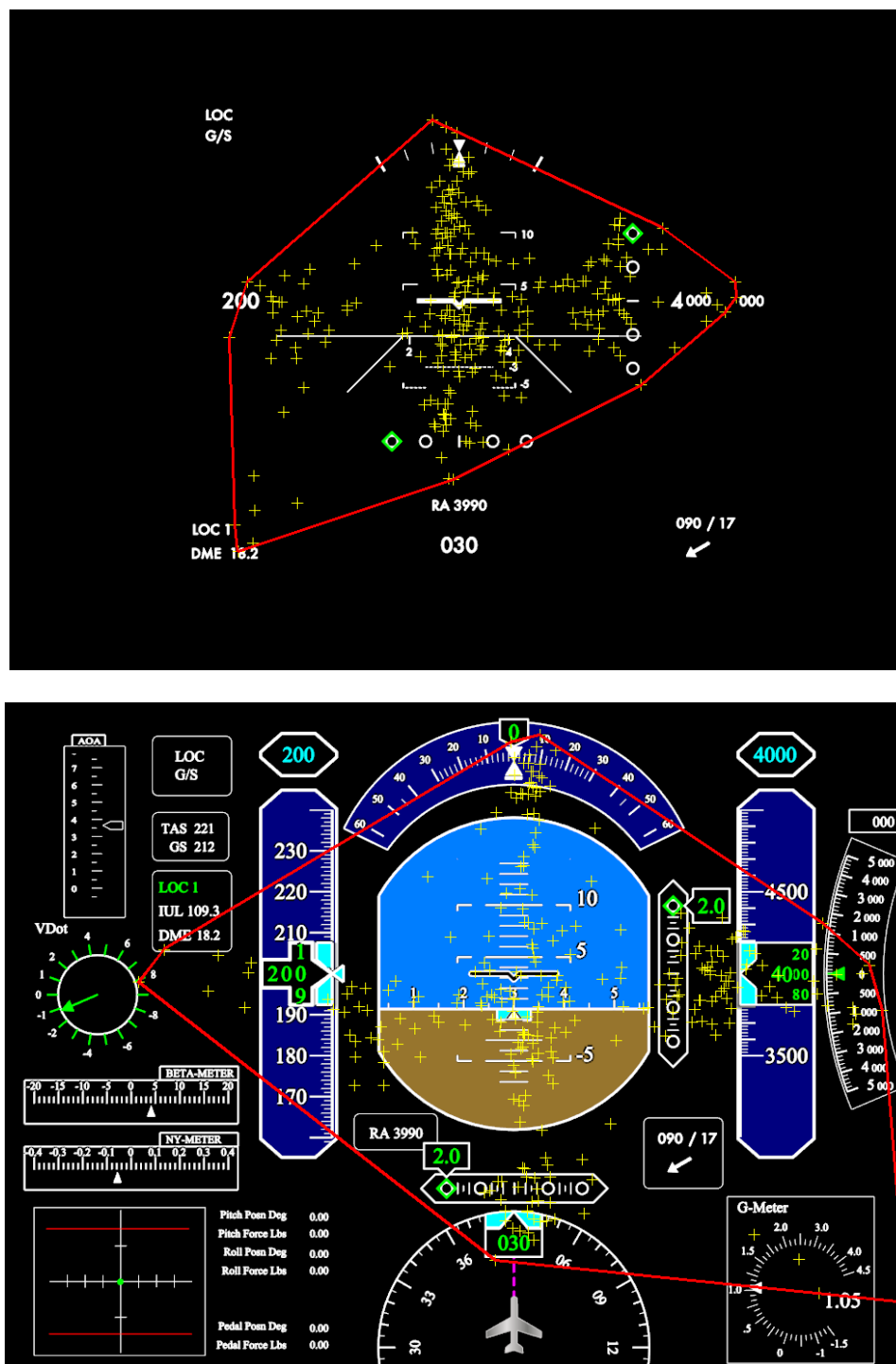


Figure 6.21 Vue des limites de la surface convexe (en trait rouge) couverte par les fixations visuelles (les croix jaunes) pour les écrans ayant un encombrement faible et un encombrement élevé. Les données sont celles du pilote 9 durant une répétition de l'approche et couvrent les deux étapes de vol.

La Figure 6.22 présente la surface convexe couverte par les fixations en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Nous avons observé la même tendance entre les deux étapes de vol, c'est pourquoi les résultats de la Figure 6.22 sont la moyenne des deux étapes de vol. La surface des écrans ayant un encombrement faible et modéré a été la même, soit $1.5 \times 10^5 \text{ pixels}^2$. La surface de l'écran ayant un encombrement élevé a été de $2.0 \times 10^5 \text{ pixels}^2$ et la barre d'erreur de cette condition a été plus grande, indiquant plus de variabilité entre les participants.

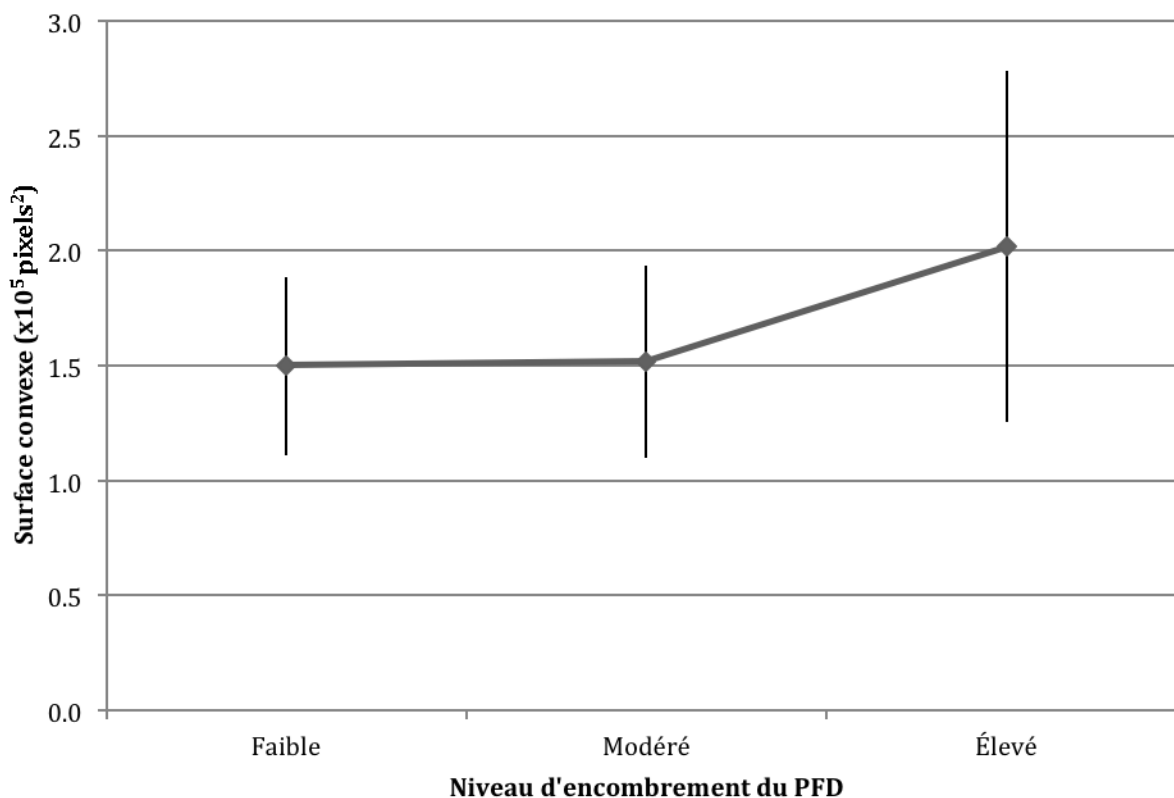


Figure 6.22 Surface convexe couverte par les fixations visuelles en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Le regard des participants a couvert une plus grande surface avec l'écran encombré. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.

6.4.6 Fixations visuelles sur l'indicateur de déviation latérale

Afin de comprendre l'effet significatif de l'encombrement visuel sur le contrôle latéral de l'avion, nous avons analysé le parcours visuel des participants sur la région d'intérêt de l'indicateur de déviation latérale durant les deux étapes de vol. Nous présentons les résultats du

nombre cumulatif et du temps cumulatif de fixations visuelles sur la région d'intérêt. Nous avons réalisé la même analyse pour l'indicateur de déviation verticale à la section 6.4.7.

6.4.6.1 Nombre cumulatif de fixations

La Figure 6.23 présente le nombre cumulatif de fixations visuelles sur l'indicateur de déviation latérale durant une étape de vol. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol, car nous avons observé la même tendance entre les deux étapes. Les résultats montrent une diminution du nombre de fixations visuelles passant de 40 à 30 avec l'augmentation du niveau d'encombrement. La barre d'incertitude est aussi la plus petite pour l'écran ayant un encombrement élevé, indiquant que la diminution du nombre de fixations observée pour cet écran a été semblable entre les participants.

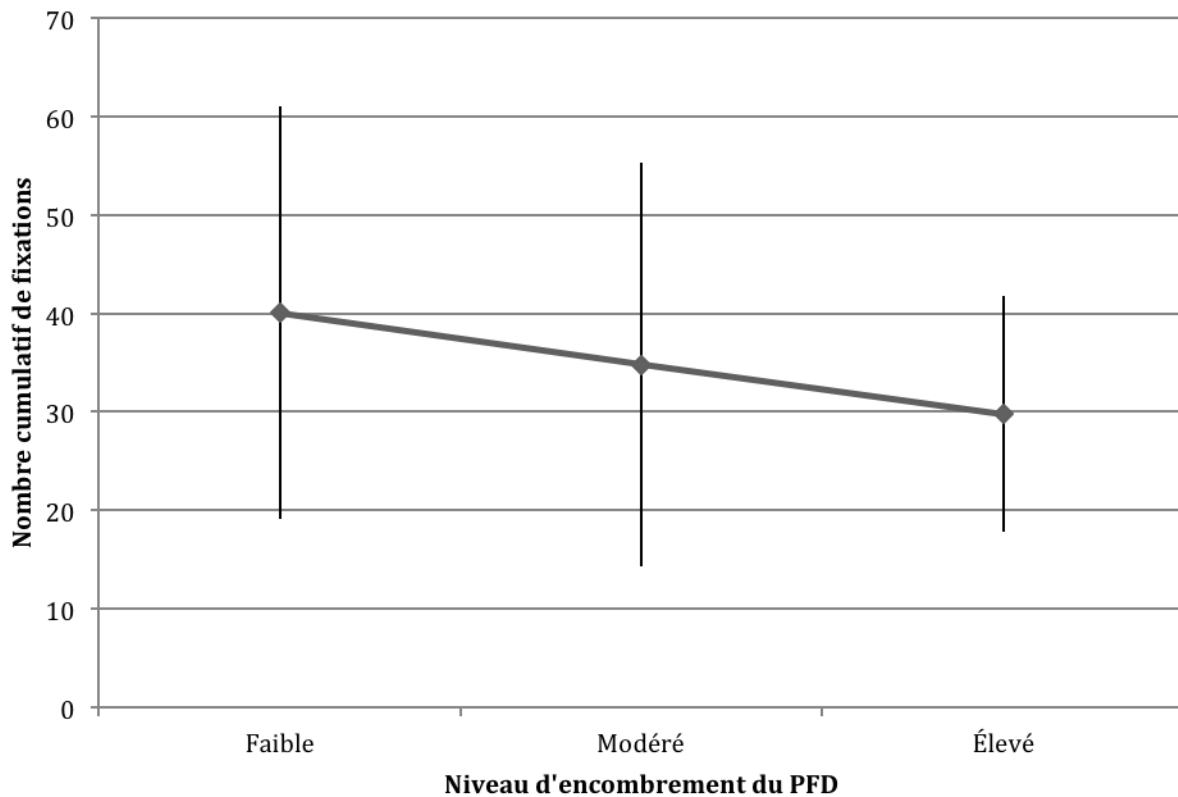


Figure 6.23 Nombre cumulatif de fixations visuelles sur l'indicateur de déviation latérale en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.

6.4.6.2 Temps cumulatif de fixation

La Figure 6.24 présente le temps cumulatif de fixation visuelle sur l'indicateur de déviation latérale. On y observe la même tendance que pour le nombre de fixations, soit une diminution du temps d'observation de 4.6 secondes en moyenne entre l'écran ayant un faible encombrement par rapport à celui ayant un encombrement élevé.

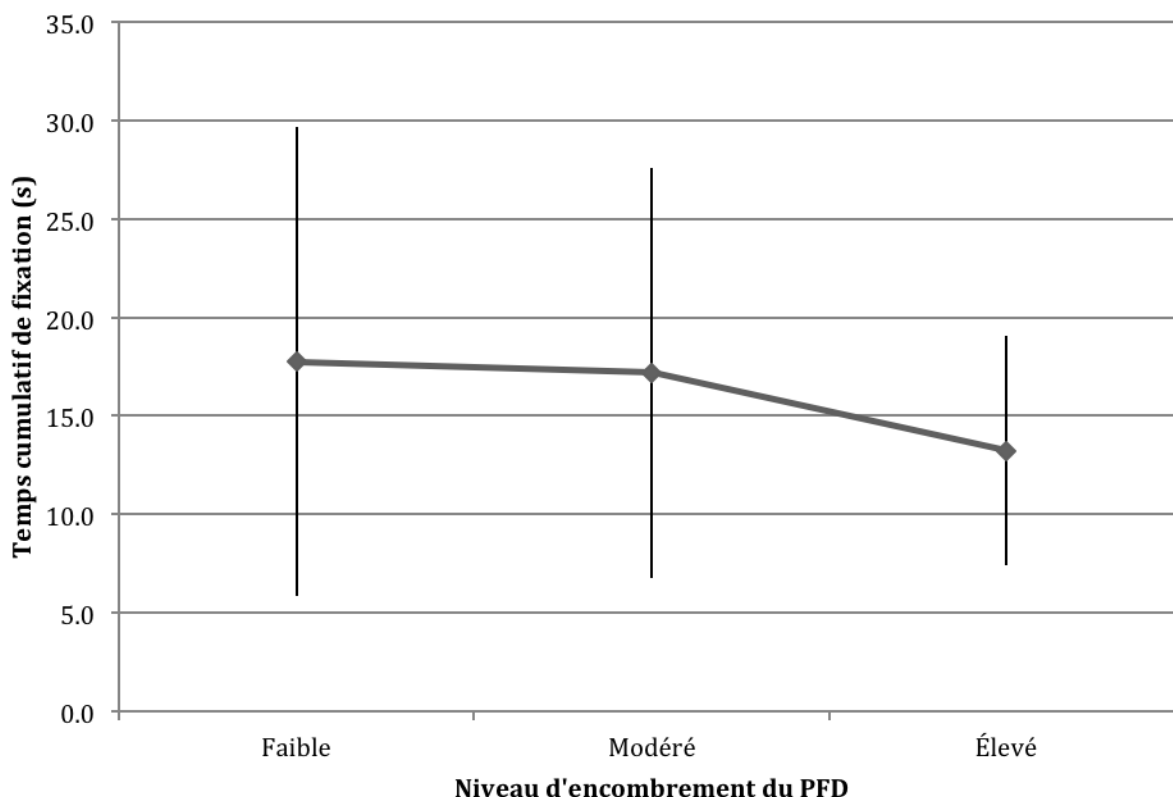


Figure 6.24 Temps cumulatif de fixations visuelles sur l'indicateur de déviation latérale en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.

6.4.7 Fixations visuelles sur l'indicateur de déviation verticale

Bien que nous n'ayons pas observé d'effet significatif de l'encombrement visuel sur le contrôle vertical de l'appareil, nous avons réalisé une analyse du parcours visuel de l'indicateur de déviation verticale. L'intérêt est de pouvoir comparer les résultats obtenus précédemment avec l'indicateur de déviation latérale et de comprendre le parcours visuel du participant en fonction du niveau d'encombrement.

6.4.7.1 Nombre cumulatif de fixations

La Figure 6.25 présente le nombre cumulatif de fixations visuelles sur l'indicateur de déviation verticale en fonction du niveau d'encombrement. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol. On observe une diminution nette du nombre de fixations visuelles avec l'encombrement, passant de 25 fixations pour l'écran ayant un faible encombrement à 10 fixations pour l'écran ayant un encombrement élevé. Cette tendance est la même entre les deux étapes de vol, indiquant que les participants ont alloué moins d'attention visuelle à l'indicateur de déviation verticale lorsqu'ils ont utilisé l'écran ayant un encombrement élevé.

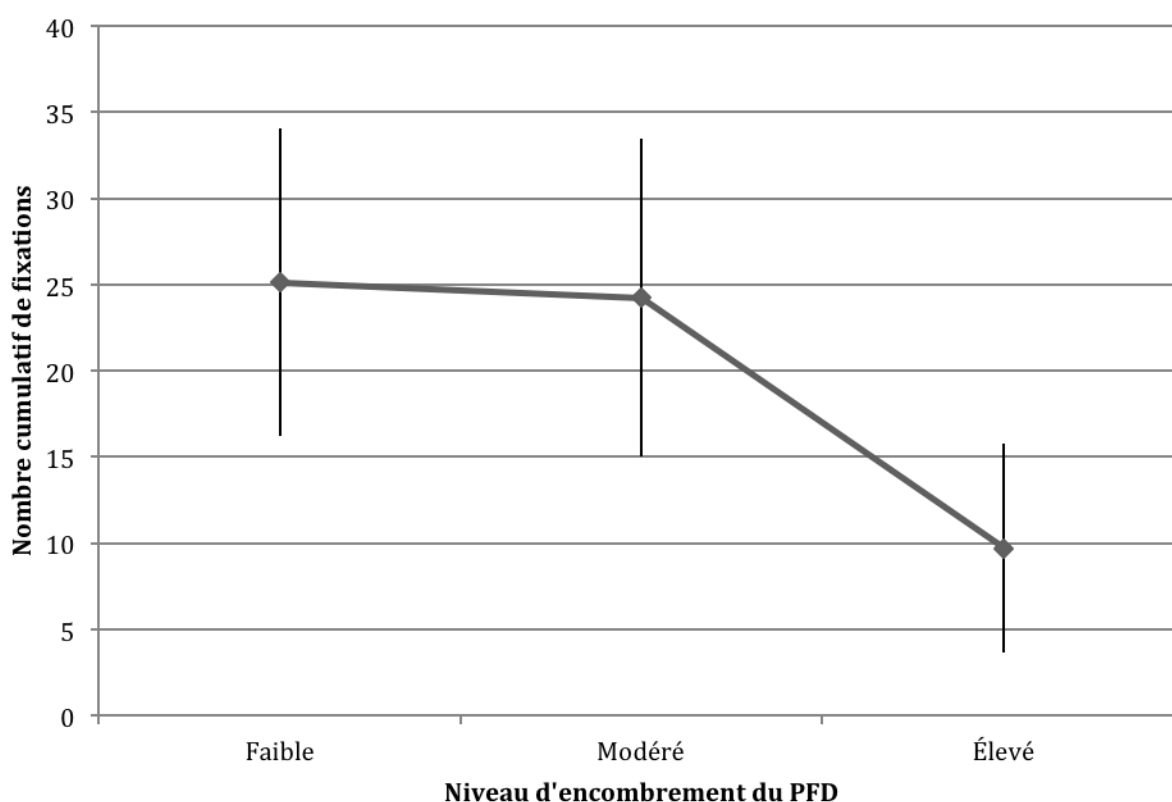


Figure 6.25 Nombre cumulatif de fixations visuelles sur l'indicateur de déviation verticale en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.

6.4.7.2 Temps cumulatif de fixation

La Figure 6.26 présente le temps cumulatif de fixation visuelle sur l'indicateur de déviation verticale. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol. On y observe la même tendance

que pour le nombre de fixations, soit que les participants ont consacré moins de ressources visuelles à observer l'instrument de déviation verticale lorsqu'ils ont utilisé l'écran encombré. Les résultats ont montré que les participants ont observé l'instrument en moyenne 4.1 secondes durant une phase de vol lorsqu'ils ont utilisé l'écran encombré, alors qu'ils ont consacré plus du triple du temps lorsqu'ils ont utilisé les écrans ayant un niveau d'encombrement faible et modéré, soit 11.6 et 12.1 secondes respectivement.

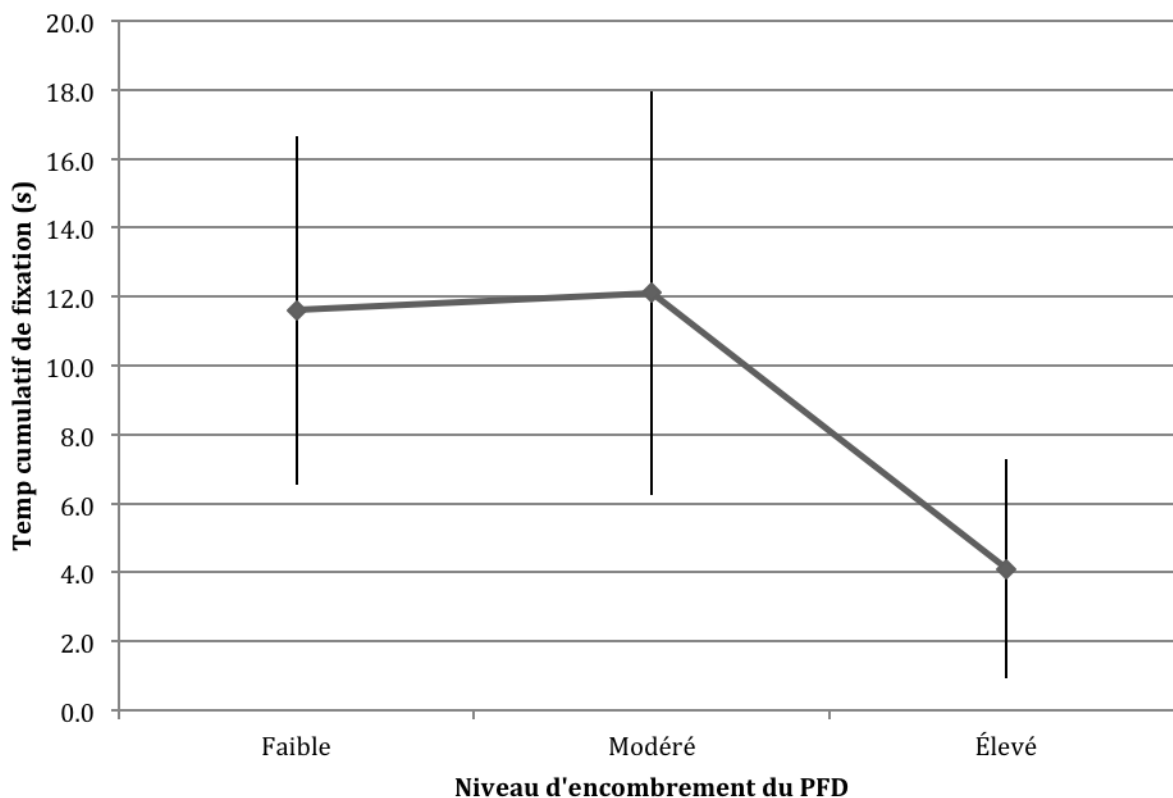


Figure 6.26 Temps cumulatif de fixation visuelle sur l'indicateur de déviation verticale en fonction du niveau d'encombrement du PFD. Les résultats sont la moyenne des deux étapes de vol.

6.5 Discussion

Cette étude a porté sur les effets de l'encombrement visuel sur la performance des pilotes en utilisant trois PFDs expérimentaux conçus pour varier le niveau d'encombrement visuel. Nous avons mesuré trois groupes de variables dépendantes pour tester les effets de l'encombrement visuel, soit la perception subjective, la performance technique de vol et le patron visuel.

Dans cette section, nous analysons les résultats obtenus et nous mettons en évidence la contribution à l'avancement des connaissances de cette étude par rapport aux résultats des études précédentes. La section se termine en présentant les implications de nos résultats pour la conception d'affichages et les limites de notre étude.

6.5.1 Perception subjective

Nous avons obtenu des résultats clairs et significatifs pour toutes les variables dépendantes subjectives étudiées. Les pilotes ont perçu les PFDs que nous avons conçus pour l'étude comme ayant un niveau d'encombrement visuel différent. Les PFDs ayant un niveau d'encombrement faible, modéré et élevé ont été perçus comme tel sur l'échelle d'évaluation de l'encombrement. Ce résultat montre que les stimuli expérimentaux utilisés pour l'étude étaient suffisamment différents et que cette différence était acceptée entre les participants. Ce résultat confirme l'hypothèse H1 voulant que l'évaluation subjective du niveau d'encombrement par les participants augmente en fonction du niveau d'encombrement de l'écran (faible, modéré et élevé) que nous avons établi. Finalement, ce résultat confirme la validité de l'échelle d'évaluation de l'encombrement visuel développée par Kaber et ses collègues (Kaber et al., 2008).

Le classement des facteurs contribuant à l'encombrement visuel a montré que les pilotes ont perçu le facteur de densité comme étant le plus important contributeur. Tous les facteurs liés à la tâche (redondance, dynamisme, variabilité) ont été perçus comme contribuant également à l'encombrement. À l'opposé, la couleur a été perçue comme le facteur contribuant le moins à l'encombrement. Durant l'entrevue, les pilotes ont expliqué qu'un écran visuellement dense sera perçu comme encombré car il est plus difficile de distinguer les symboles et les groupes d'information affichés. Sept pilotes ont identifié l'abondance de lignes et neuf pilotes ont identifié la présence d'instrumentations inutiles comme les principaux contributeurs à l'encombrement visuel de l'écran ayant un encombrement élevé. Au contraire, les commentaires des pilotes indiquent que l'utilisation judicieuse des couleurs a permis de distinguer les groupes d'informations du PFD ayant un encombrement modéré. Retirer les couleurs d'un affichage pour diminuer son niveau d'encombrement visuel a eu un effet négatif sur la perception des groupes d'informations de la part de l'utilisateur. Sept pilotes ont dit avoir eu de la difficulté à distinguer les instruments de l'écran ayant un encombrement faible, principalement à cause de l'absence de couleur.

Nos résultats ont montré un effet clair de l'encombrement visuel sur la charge mentale de travail. Les pilotes utilisant l'écran modérément encombré ont rapporté un niveau de charge mentale de travail inférieur que pour les écrans avec un encombrement faible ou élevé. Ce résultat confirme l'hypothèse H3 voulant que le niveau de charge mentale de travail est minimale pour l'écran ayant un encombrement modéré comparativement aux écrans ayant un encombrement faible ou élevé. Notre résultat est aussi similaire à celui rapporté dans (Alexander et al., 2012). Il indique que les pilotes ont eu plus de ressources mentales disponibles durant l'approche en utilisant l'écran ayant un niveau d'encombrement modéré. L'absence des sélecteurs et des indicateurs de tendance sur l'écran ayant un encombrement faible a exigé plus de ressources mentales de la part des pilotes pour mémoriser les cibles de vitesse et d'accélération. Durant l'entrevue, cinq pilotes ont identifié l'effort de mémorisation supplémentaire requis par cet écran comme une source de charge mentale de travail. Pour l'écran ayant un niveau élevé d'encombrement, les pilotes ont fourni deux raisons pour expliquer la charge mentale de travail supérieure. Premièrement, cinq pilotes ont dit devoir filtrer l'écran pour ignorer l'information inutile présentée, car celle-ci les déconcentrait dans leur tâche. Cette observation est supportée par la longueur d'une saccade 15% plus grande et une surface couverte par les fixations qui est 33% plus grande pour l'écran encombré comparativement aux deux autres écrans, suggérant que le patron d'observation des pilotes a été plus exigeant pour cet écran. Deuxièmement, trois pilotes ont perçu l'écran comme étant trop dynamique, avec ces nombreux indicateurs. Par conséquent, les pilotes ont investi plus d'effort et d'attention pour compléter l'approche utilisant l'écran ayant un encombrement élevé. Finalement, il est important de rappeler que les pilotes ont complété un vol manuel sans assistance des systèmes de guidage automatisés. Il s'agit d'une tâche exigeante requérant une attention soutenue du pilote aux commandes. Cela a sans doute eu pour effet d'augmenter le niveau de base de la charge mentale de travail. En effet, la charge mentale ayant l'écran ayant un encombrement modéré a été de 10.1, ce qui correspond à une demande modérée.

La qualité visuelle globale perçue par les pilotes a suivi la même tendance que la charge mentale de travail. Le PFD modérément encombré a été jugé comme esthétiquement plus agréable que les PFDs ayant un niveau d'encombrement faible ou élevé. Ce nouveau résultat montre que l'encombrement visuel et la qualité esthétique sont clairement liés pour le PFD. En entrevue, les pilotes ont fait référence à la qualité esthétique des écrans comme un facteur contribuant à l'encombrement et à leur perception de l'utilité de l'affichage. Commentant l'écran ayant un

niveau modéré d'encombrement, les pilotes ont observé que l'écran était clair (4 pilotes), facilitait le balayage visuel (3 pilotes) et que le choix de couleurs a aidé la distinction des instruments (2 pilotes). Le pilote 12 s'est même exclamé « Oh, c'est beau! » en voyant l'écran pour la première fois²⁴. Au contraire, les observations sur la qualité visuelle de l'écran ayant un niveau d'encombrement élevé ont été majoritairement négatives. Six pilotes ont eu une réaction émotive négative envers cet écran, en qualifiant l'écran « d'horrible » (4 pilotes), de « stressant et agressif » (1 pilote) ou disant se sentir « inconfortable et frustré » d'utiliser ce PFD (2 pilotes). Cinq pilotes ont dit que l'écran leur a donné l'impression de voler un « vieil avion avec plein de cadrans ». La réaction négative – et parfois même viscérale – des pilotes par rapport à l'écran ayant un encombrement élevé explique sa faible qualité visuelle perçue.

Il est important de noter que nos résultats sur la qualité visuelle affichent la même tendance observée dans (Gannon, 2005) où le PFD esthétiquement plus agréable a obtenu un niveau de charge mentale de travail inférieur. Contrairement à (Gannon, 2005) notre étude n'a pas manipulé la qualité visuelle du PFD, mais a plutôt mesuré l'effet de l'encombrement visuel sur la qualité visuelle perçue par les pilotes. Une prochaine étude pourrait s'intéresser à étudier l'effet de l'interaction entre l'encombrement visuel et la qualité visuelle du PFD sur la performance du pilote.

6.5.2 Performance technique de vol

Alors que l'effet de l'encombrement visuel sur la charge mentale de travail a été clair, son effet sur la performance technique de vol a été faible. Nos résultats ont montré que la déviation latérale moyenne et le contrôle de la déviation latérale ont été les deux seules variables, sur les 11 variables mesurées, à être significativement différentes entre les niveaux d'encombrement. Dans ces deux cas, l'écran ayant un encombrement modéré a eu la meilleure performance. Les mesures d'oculométrie fournissent une première explication de ce résultat. Les pilotes utilisant l'écran ayant un encombrement élevé ont réalisé 15% moins de fixations sur l'indicateur de déviation latérale et ont observé l'indicateur 23% moins longtemps que pour l'écran ayant un niveau

²⁴ Le PFD avec un niveau modéré d'encombrement était le dernier écran présenté au pilote 12. Son observation sur la qualité visuelle de l'écran était donc en fonction des trois PFDs testés.

d'encombrement modéré. Cette indication suggère que les participants ont été capables de consacrer plus d'attention à l'indicateur de déviation latérale lorsqu'ils ont utilisé l'écran ayant un niveau modéré d'encombrement. Toutefois, cette explication ne s'applique pas à l'écran ayant un niveau d'encombrement faible, car il affiche des résultats d'oculométrie similaires à l'écran ayant un niveau d'encombrement modéré. L'absence de sélecteur de cap et l'étroitesse de la ligne d'horizon artificiel de l'écran ayant un encombrement faible sont de meilleures explications pour la différence de déviation latérale moyenne (Muthard & Wickens, 2005). En effet, la Figure 6.7 montre que la barre d'incertitude de la déviation latérale moyenne a été la plus grande pour l'écran ayant un faible encombrement, indiquant une plus grande variabilité du résultat entre les participants. De plus, la valeur de déviation latérale a changé le plus pour l'écran ayant un encombrement faible, comme l'indique la valeur supérieure du contrôle de la déviation latérale (voir Figure 6.8). Ces deux résultats indiquent que les participants ont eu plus de difficulté à maintenir et à corriger leur cap avec l'écran faiblement encombré. En entrevue, les pilotes ont expliqué avoir une conscience limitée que le cap de l'appareil déviait du cap prescrit durant l'approche, car l'écran faiblement encombré ne présentait pas de sélecteur de cap. De plus, la petite taille de l'horizon artificiel sur l'écran a amené les pilotes à effectuer des virages trop prononcés pour corriger leur cap, car il ne renseignait pas suffisamment sur l'ampleur du virage réalisé. Ces deux problèmes étaient absents de l'écran ayant un encombrement modéré; celui-ci affichait un sélecteur de cap et la ligne d'horizon artificiel faisait toute la taille de l'écran, offrant ainsi un indice visuel plus saillant de l'ampleur du virage.

Nous n'avons observé aucun effet de l'encombrement visuel sur les autres variables de performance technique de vol, soit la déviation verticale, l'activité du mini-manche et la vitesse verticale. Nous expliquons l'effet faible de l'encombrement visuel sur ces variables par deux raisons. Premièrement, les pilotes qui ont participé à l'étude sont des pilotes expérimentés, ayant volé plus de 4000 heures en moyenne. L'expertise et la connaissance qu'ont les pilotes de l'appareil leur ont permis d'anticiper le comportement de l'avion et cet effet n'a pas été influencé par l'encombrement visuel. Deuxièmement, les résultats subjectifs montrent que les pilotes ont rapporté un niveau de charge mentale de travail supérieur pour les écrans ayant un niveau d'encombrement faible ou élevé. Ceci suggère que les pilotes ont compensé les effets de l'encombrement visuel sur la performance objective en consacrant plus d'attention à la tâche à

accomplir en utilisant ces écrans afin d'obtenir un niveau de précision similaire durant l'approche.

Globalement, ces résultats confirment partiellement l'hypothèse H2 voulant que la performance technique de vol diminue pour l'écran ayant un encombrement élevé comparativement aux écrans ayant un encombrement faible et modéré. Nous avons observé un effet significatif de l'encombrement visuel pour deux des 11 variables indiquant une meilleure performance technique de vol pour l'écran ayant un encombrement modéré comparativement aux deux autres, mais cet effet a été faible. Nos résultats impliquent que pour la tâche dynamique réalisée, le niveau d'encombrement visuel de l'écran a un effet faible sur la performance objective du participant.

Au contraire, nous avons observé un effet plus important de l'étape de vol sur la performance technique de vol, avec sept des 11 variables étudiées montrant une différence significative. Ces résultats montrent que les pilotes ont été plus actifs durant l'étape finale de l'approche afin d'optimiser le parcours de l'avion pour réussir l'atterrissage. Il faut aussi mentionner que les mesures de déviation latérale et verticale sont plus sensibles au fur et à mesure que l'appareil s'approche de la piste d'atterrissage, car la taille du faisceau de radio guidage se réduit.

6.5.3 Parcours visuel

Nous avons analysé le parcours visuel de quatre participants durant l'étude. Il s'agit de nouveaux résultats afin de comprendre l'influence de l'encombrement visuel de l'affichage sur le patron de regard des pilotes. La petite taille de notre échantillon ($n=4$) nous a empêché de faire une analyse statistique des résultats; nous avons opté pour une analyse descriptive des résultats en rapportant la tendance observée du résultat.

Nous avons trouvé que la longueur d'une saccade et la surface couverte par les fixations ont été supérieures pour l'écran ayant un encombrement élevé comparativement aux écrans ayant un niveau d'encombrement inférieur. Ces résultats indiquent que les participants ont balayé une plus grande portion de l'écran pour extraire l'information pertinente pour la tâche de vol lorsqu'ils ont utilisé l'écran ayant un encombrement élevé, contribuant à un effort supplémentaire pour utiliser cet écran. Nous avons aussi trouvé que la durée moyenne d'une fixation visuelle durant l'étape de vol finale a été la plus longue pour l'écran ayant un encombrement modéré. Ce résultat indique

que durant l'étape de vol la plus exigeante, les participants ont été capables d'allouer plus d'attention durant chaque fixation en utilisant cet affichage, comparativement aux écrans ayant un encombrement faible ou élevé. Cela n'a pas affecté le patron de surveillance des instruments, car le nombre de transitions entre les zones a été le même entre les écrans (voir Figure 6.20).

Les résultats pour l'observation des indicateurs de déviation latérale et verticale sont étonnants. Nous avons observé la même tendance pour les quatre résultats présentés, soit que les écrans ayant un encombrement faible ou modéré affichent la même valeur et que celle-ci diminue pour l'écran ayant un encombrement élevé. De plus, cette tendance est différente de celle des résultats de performance technique de vol, où l'écran ayant un encombrement modéré a obtenu une meilleure précision pour la déviation latérale. Les résultats du parcours visuel indiquent que les quatre pilotes ont alloué moins de ressources visuelles aux indicateurs de guidage latéral et vertical durant l'approche pour l'écran ayant un encombrement élevé. Toutefois, cela n'a pas modifié le patron de surveillance de cet écran puisque que le nombre de transition est semblable pour tous les niveaux d'encombrement et que la durée moyenne d'une fixation est la même pour les écrans ayant un niveau d'encombrement faible ou élevé.

Nos résultats confirment l'hypothèse H4 voulant que l'efficacité du parcours visuel du pilote diminue pour l'écran ayant un encombrement élevé comparativement aux écrans ayant un encombrement faible et modéré. Une interprétation de ces résultats serait que la disposition de l'interface avec un encombrement élevé a distrait le parcours visuel des participants en offrant plus d'indicateurs et de symboles à surveiller durant l'approche, réduisant d'autant le temps d'observations des indicateurs de déviation. Au contraire, la disposition des interfaces avec un encombrement faible ou modéré a permis aux participants de consacrer plus de ressources visuelles aux indicateurs de déviation, puisque ceux-ci étaient distincts des autres instruments que ces écrans avaient moins de symboles à surveiller.

Les effets de l'encombrement visuel sur le parcours visuel que nous avons trouvés dans notre étude sont comparables à ceux observés précédemment dans la littérature (Moacdieh et al., 2013; Moacdieh & Sarter, 2012). Moacdieh et Sarter (2012) ont identifié 12 mesures de parcours visuel différentes en fonction du niveau d'encombrement visuel d'un affichage dans une tâche de prospection visuelle, avec des résultats fortement significatifs. Dans notre étude, cinq des six mesures utilisées ont montré une différence (non statistique) en fonction du niveau

d'encombrement du PFD, soit la durée d'une fixation, la longueur moyenne d'une saccade, la surface couverte par les fixations, et le nombre total et la durée moyenne de fixations visuelles sur l'instrument de guidage. La différence est surtout notable pour l'écran ayant un niveau d'encombrement élevé. Il est important de noter que la différence entre les résultats fortement significatifs de (Moacdieh & Sarter, 2012) et les nôtres s'explique par la nature de la tâche réalisée par les participants. La tâche de vol n'est pas limitée dans le temps et montre un parcours visuel en circuit fermé typique d'une activité de surveillance qui est différente d'une tâche de prospection visuelle restreinte dans le temps (voir Henderson, 2003). Cette observation soulève le besoin de développer des métriques d'oculométrie pertinentes pour la tâche de vol et sensibles à l'encombrement visuel du PFD.

Dans une étude en simulateur de vol, Moacdieh, Prinnet et Sarter (2013) ont trouvé que le nombre de transitions du parcours visuel entre les zones d'informations à l'écran diminue avec le niveau d'encombrement visuel du PFD. Dans leur étude, Moacdieh et ses collègues ont défini les principaux instruments du PFD comme des régions d'intérêts (ROI). Cette méthode limite la comparaison des résultats entre les ROI, car ceux-ci n'ont pas la même taille. De plus, cette méthode a le désavantage d'augmenter le risque de commettre une erreur de type I (faux-positif), soit de conclure à un effet significatif alors qu'il ne l'est pas, en ne limitant pas le nombre de ROI et le nombre de comparaisons entre les ROI²⁵. Dans notre étude, nous avons segmenté le PFD à l'aide d'une grille de 14 x 10 cellules de même taille et n'avons observé aucune différence entre le nombre de transitions entre les cellules en fonction du niveau d'encombrement visuel. Toutefois, nous avons observé une diminution du nombre de fixations avec le niveau d'encombrement sur les ROI des indicateurs de déviation latérale et verticale, un résultat qui montre la même tendance que celle observée par (Moacdieh et al., 2013).

²⁵ Il est plus probable d'obtenir une différence significative en multipliant le nombre de variables étudiées et le nombre de comparaison entre les variables (Simmons, Nelson, & Simonsohn, 2011). Simmons et ses collègues (2011) proposent une méthode pour réduire le risque de faux-positif dans les études comportementales, soit de définir au préalable le nombre de variables à mesurer, le type d'analyse statistique à réaliser et le critère pour choisir le nombre de participants. Ces décisions doivent être rapportées comme tel dans la communication scientifique.


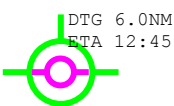

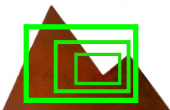
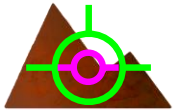
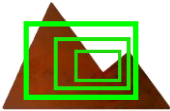
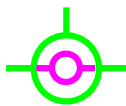
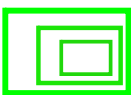
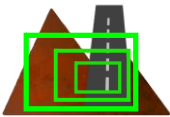

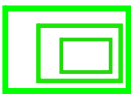
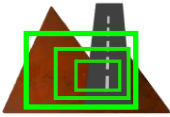








6.5.4 Comparaison avec les autres études

Nous pouvons désormais ajouter nos résultats au Tableau 2.4 comparant l'effet de l'encombrement visuel sur la performance du contrôle de l'avion. Le nouveau tableau mis à jour est présenté au Tableau 6.6 ci-dessous. Ce tableau synthèse montre que la meilleure performance de vol est obtenue pour un écran de vol ayant un encombrement modéré ou élevé. De plus, notre étude a confirmé ce résultat en manipulant avec confiance le niveau d'encombrement visuel – et en ne manipulant uniquement que le niveau d'encombrement visuel – tout en conservant constante la variable de fonction de guidage du PFD.

La comparaison de l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de vol de différentes études indique qu'il est préférable d'optimiser le niveau d'encombrement visuel plutôt que de le minimiser. Dans les affichages ayant un encombrement minimal il manque les informations de tendance utiles aux pilotes pour anticiper le comportement de l'avion. Ces informations prédictives facilitent la tâche du pilote en réduisant le niveau de charge mentale de travail durant le vol.

Lorsque l'on compare les résultats des trois études qui ont manipulé le niveau d'encombrement visuel du PFD sans modifier la fonction de guidage, soit les études de (Ververs & Wickens, 1996, 1998) et notre étude, on constate que l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de vol est faible. Notre étude ajoute comme nouveau résultat que son effet sur la perception de la performance, soit la charge mentale de travail, est clair et important. Ces constats impliquent que l'encombrement visuel est une variable d'optimisation. C'est-à-dire que du point de vue de la performance objective de la tâche réalisée, des pilotes expérimentés seront capables de compléter l'approche avec un affichage présentant les informations nécessaires au vol peu importe son niveau d'encombrement. Toutefois, du point de vue de l'utilisation de ressources cognitives et de la satisfaction du pilote, optimiser l'encombrement visuel permet de faciliter la complétion de la tâche. Dans le contexte aérospatial marqué par des exigences de performance élevée et de fortes contraintes temporelles, l'optimisation de l'encombrement visuel des affichages est un sujet pertinent qui mérite toujours une attention soutenue des ergonomes.

Tableau 6.6 Effet de l'encombement visuel sur la performance du contrôle de l'avion.

<i>Étude</i>	<i>Fonctions sur l'affichage avec un niveau d'encombement</i>			<i>Meilleure performance</i>	
	<i>Faible</i>	<i>Modéré</i>	<i>Élevé</i>	<i>Vol</i>	<i>Détection</i>
(Ververs & Wickens, 1996, 1998)		-		Non significatif	Encombement faible
(Wickens, Alexander, Horrey, et al., 2004)		-		Encombement élevé	Encombement faible
(Alexander et al., 2005)		-		Encombement élevé	Encombement faible
(Alexander et al., 2012, 2009)				Encombement modéré	-
(Kim et al., 2011; Naylor, 2010)				Encombement modéré	-
Notre étude				Encombement modéré (effet faible)	-
Légende	 FPV + FD	DTG 6.0NM ETA 12:45 Libellé	 Tunnel	 Vision synthétique	 Vision améliorée
	 LOC + GS				

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Ce dernier chapitre regroupe l'essentiel des nouvelles connaissances développées dans cette thèse, indique les implications de nos résultats pour la conception d'affichages, présente les limitations de notre étude et suggère deux pistes de recherche pour de prochaines études.

7.1 Synthèse du travail

Cette thèse a été réalisée à un moment où l'encombrement visuel des affichages du poste de pilotage croît. L'apparition de nouvelles technologies à bord de l'avion et la complexité croissante des opérations de vol exigent de présenter plus d'informations à l'équipage. Les organismes réglementaires en aviation ont rédigé des exigences demandant de minimiser l'encombrement visuel des affichages de la cabine de pilotage. Or, les résultats précédents d'études expérimentales en simulateur de vol, montrent un effet mixte de l'encombrement visuel sur la performance technique de vol du pilote. Nous avons expliqué cet effet mixte par le fait que les études précédentes ont manipulé simultanément le niveau d'encombrement et la fonction de guidage de l'écran. De plus, la compréhension de ce qu'est l'encombrement visuel, des facteurs y contribuant et des méthodes pour l'évaluer était encore à parfaire.

Les objectifs de cette thèse ont été de faire avancer la connaissance sur les causes de l'encombrement visuel des affichages et leurs effets sur la performance de l'utilisateur dans une tâche dynamique, de même que d'aider les concepteurs d'interfaces graphiques en leur permettant de prendre de meilleures décisions de conception sur le niveau d'encombrement visuel optimal de l'affichage à l'aide de lignes directrices. Ces objectifs, en tenant compte des limitations présentées ci-dessous, ont été atteints.

Pour ce faire, nous avons réalisé une étude expérimentale en simulateur de vol. Nous avons conçu trois écrans primaires de vol ayant un niveau d'encombrement visuel différent (faible, modéré, élevé) en respectant les nouvelles règles de conception proposées à la section 2.4.3 afin de changer le niveau d'encombrement visuel sans modifier la fonction de guidage ou l'organisation de l'écran.

Par la suite, 12 pilotes ayant une expérience moyenne de 4415 heures de vol ont complété une approche manuelle de vol aux instruments en simulateur de vol. Les deux variables indépendantes de l'étude ont été le niveau d'encombrement du PFD avec trois valeurs :

encombrement faible, encombrement modéré et encombrement élevé; et l'étape de vol avec deux valeurs : approche initiale et approche finale. Les participants ont complété l'approche en réalisant trois répétitions pour chacun des trois écrans, pour un total de neuf approches. Nous avons mesuré l'effet de l'encombrement visuel des écrans sur un ensemble de variables dépendantes subjectives et objectives, soit l'évaluation de l'encombrement visuel, la charge mentale de travail, la qualité visuelle de l'interface, la performance technique de vol, et le parcours visuel.

Les résultats obtenus ont montré que l'effet de l'encombrement visuel a été fortement significatif pour tous les questionnaires subjectifs, soit l'évaluation de l'encombrement visuel ($p < .001$), la charge mentale de travail ($p < .005$) et la qualité visuelle de l'interface ($p < .001$).

Les PFDs ayant un niveau d'encombrement faible, modéré et élevé ont été perçus comme tel sur l'échelle d'évaluation de l'encombrement. La densité de symboles à l'écran a été le facteur identifié par les participants qui a le plus contribué à l'encombrement, alors que l'utilisation de couleur a été le facteur qui a le moins contribué à l'encombrement. Les pilotes ont indiqué que l'utilisation des couleurs a permis de distinguer les groupes d'informations du PFD avec un encombrement modéré.

La charge mentale de travail a été clairement affectée par le niveau d'encombrement. L'écran ayant un encombrement modéré a obtenu le plus bas niveau de charge mentale de travail telle que mesurée par l'échelle du NASA-TLX. Ce résultat indique que les pilotes ont eu plus de ressources mentales disponibles durant la phase d'approche en utilisant l'écran ayant un niveau d'encombrement modéré.

Les résultats sur la qualité visuelle des PFDs ont montré que l'encombrement visuel et la qualité esthétique des affichages sont liés. Bien que nous n'ayons pas manipulé la qualité visuelle des affichages dans notre expérience, une prochaine étude pourrait s'attarder à son interaction avec l'encombrement visuel et leurs effets sur la performance objective et subjective dans une tâche de vol. Le cadre expérimental présenté dans cette thèse pourrait être adapté pour permettre une telle étude.

L'hypothèse d'une diminution de la performance technique de vol en fonction de l'augmentation du niveau d'encombrement visuel a été partiellement validée par les résultats, montrant que l'écran ayant un encombrement modéré a obtenu une meilleure précision pour la déviation

latérale moyenne ($p < .05$) et le contrôle de la déviation latérale ($p < .005$) comparativement aux écrans ayant un encombrement faible et élevé. Toutefois, il s'agit des deux seules variables dépendantes sur les onze mesurées ayant montré une différence significative en fonction de l'encombrement visuel.

L'analyse des fixations visuelles à l'écran, enregistrées avec un oculomètre, a montré que le parcours visuel de l'écran ayant un encombrement élevé a été plus exigeant que celui des deux autres écrans. Nos résultats ont montré que la longueur d'une saccade et la surface couverte par les fixations ont été supérieures pour l'écran ayant un encombrement élevé. Ces résultats indiquent que les participants ont balayé une plus grande portion de l'écran pour extraire l'information pertinente pour la tâche de vol lorsqu'ils ont utilisé l'écran avec un encombrement élevé, contribuant à un effort supplémentaire pour utiliser cet écran.

7.2 Contributions à l'avancement des connaissances

Nos travaux ont permis d'apporter trois principales contributions à l'avancement des connaissances sur l'encombrement visuel et ses effets sur la performance. Premièrement, nous avons proposé une nouvelle définition de l'encombrement visuel qui identifie les trois dimensions importantes pour l'étude de l'encombrement visuel : la densité visuelle, la présence d'information superflue et le contexte de la tâche (voir section 2.1.7). Cette nouvelle définition offre un cadre conceptuel plus élaboré que les définitions précédentes afin d'étudier l'optimisation de l'encombrement visuel d'un affichage en fonction des besoins en information de la tâche et du contexte dans lequel l'utilisateur interagit avec l'affichage.

Deuxièmement, nous avons apporté une contribution méthodologique en proposant une nouvelle méthode pour étudier l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de l'utilisateur (voir section 2.4.3). Cette méthode prend la forme de trois exigences que tous les affichages à l'étude doivent respecter afin d'assurer que la variable d'encombrement visuelle est manipulée durant l'étude, en laissant intouchée les autres variables. Nous avons montré que les études précédentes, portant sur l'effet de l'encombrement visuel sur la performance technique de vol du pilote, ont modifié simultanément la fonction de guidage de l'appareil ce qui peut avoir masqué l'effet de l'encombrement visuel. Nous avons utilisé la nouvelle méthodologie de notre étude pour la

conception de trois PFDs ayant un niveau d'encombrement visuel différent, mais offrant la même information de base, la même fonction de guidage et la même organisation.

Troisièmement, nous avons trouvé de nouveaux résultats sur les effets de l'encombrement visuel d'un affichage dynamique sur la performance de l'utilisateur durant une tâche complexe (voir Chapitre 6). Les résultats obtenus en simulateur de vol confirment que l'encombrement visuel a un effet clair et significatif sur la charge mentale de travail. Toutefois, son effet est faible sur la performance objective, soit la précision de l'appareil durant l'approche. Ces nouveaux résultats, obtenus en suivant un cadre méthodologique rigoureux pour la manipulation de l'encombrement visuel, confirment la pertinence de l'étude de l'encombrement visuel des affichages dynamiques car elle permet d'améliorer la performance de l'utilisateur à une tâche complexe.

Finalement, bien qu'il ne s'agisse pas d'une contribution à l'avancement des connaissances, nous avons produit des outils durant cette étude qui serviront pour de futures recherches. Les trois écrans de vol conçus pour notre étude sont bien différenciés en termes de niveau d'encombrement visuel. De futures recherches peuvent facilement modifier les paramètres du code source de même que la bibliothèque d'objets graphiques que nous avons développés afin d'étudier de nouvelles problématiques concernant l'encombrement visuel. De même, les scripts conçus pour automatiser l'extraction des données de l'oculomètre, analyser les fixations visuelles et produire des tableaux et des graphiques sommatifs peuvent être adaptés à de nouveaux affichages et utilisés pour d'autres études. L'utilisation de ces scripts réduit grandement le temps nécessaire pour l'analyse des données d'oculométrie et permet de comparer les résultats des variables indépendantes obtenues dans notre étude avec celles d'une prochaine étude.

7.3 Implications pour la conception et la réglementation

Les découvertes faites dans notre étude ont des implications pour la conception des affichages d'avion et pour la réglementation. Premièrement, nous avons développé un cadre expérimental pour contrôler le niveau d'encombrement visuel d'affichages dynamiques qui offre une garantie que seulement la variable d'encombrement visuel est variée entre les affichages. Dans cette étude, cette méthode a été appliquée aux affichages de vol du poste de pilotage, mais pourrait être généralisée à d'autres domaines comme les affichages de poste de contrôle. Le cadre

expérimental développé dans cette étude se révélera utile pour les concepteurs d'interfaces en offrant une méthode d'évaluation de l'encombrement visuel des affichages.

Deuxièmement, nous avons montré que l'encombrement visuel a un effet clair sur la charge mentale de travail de pilotes expérimentés. Ce résultat justifie la pertinence de l'optimisation de l'encombrement visuel des affichages du poste de pilotage dans une perspective d'amélioration de la sûreté et de la performance des opérations. Notre résultat suggère aussi de limiter la quantité d'information affichée au PFD et de considérer la pertinence d'un nouvel instrument avant de l'ajouter à l'écran. Dans notre expérimentation, le panneau d'ingénierie présent sur l'écran ayant un encombrement élevé a offert des indicateurs supplémentaires pour optimiser l'approche. Toutefois, les pilotes ont jugé ces instruments comme inutiles à la tâche courante, soit de compléter une approche stabilisée.

Troisièmement, nos résultats ont montré que concevoir un PFD avec le juste équilibre entre désencombrer l'écran et fournir de l'information supplémentaire au pilote a été bénéfique pour la tâche de vol. L'écran ayant un niveau d'encombrement modéré a eu l'évaluation minimale de charge mentale de travail et la meilleure évaluation de ses qualités visuelles. Ces résultats suggèrent que l'utilisation judicieuse d'information supplémentaire sur le PFD – par l'ajout d'indicateurs de tendance et de sélecteurs – et l'utilisation harmonieuse des couleurs – avec un dégradé pour l'horizon artificiel et la transparence pour les instruments – ont aidé les pilotes dans leur utilisation du PFD ayant un niveau modéré d'encombrement. Dans notre étude, le PFD avec la meilleure performance et la charge mentale de travail minimale a été celui ayant un niveau optimisé d'encombrement visuel plutôt que minimal. Ce constat est contraire à l'exigence de la réglementation aérienne demandant de *minimiser* l'encombrement visuel à l'écran. Nos résultats suggère plutôt d'*optimiser* l'encombrement visuel afin de réduire la charge de travail et améliorer la performance du pilote.

Quatrièmement, cette étude a utilisé des mesures subjectives et objectives pour tester les effets de l'encombrement visuel sur la tâche du pilote : charge mentale de travail, performance technique de vol et parcours visuel. Si nous avons mesuré que les données objectives de performance technique de vol, nous aurions observé un effet faible de l'encombrement visuel sur la tâche de pilotage. Nous encourageons les autres chercheurs de la communauté aérospatiale d'utiliser des

mesures subjectives et objectives dans leurs études afin de mieux comprendre les effets sur les pilotes des variables étudiées.

7.4 Limites de notre recherche

Afin de réaliser notre étude, nous avons réalisé des choix qui limitent la portée ou la généralisation des résultats obtenus. Cette section présente les six limitations de notre étude que nous jugeons les plus pertinentes à souligner.

Premièrement, le nombre de participants à l'étude a été limité. Douze pilotes ont complété la tâche de vol et nous avons pu analyser les résultats de parcours oculaire de quatre d'entre eux. Bien que nous ayons mesuré des effets significatifs de l'encombrement visuel sur la performance du pilote, il est attendu qu'un plus grand nombre de participants augmente la puissance statistique de l'analyse, et donc, permette d'identifier de nouveaux effets significatifs. Il en va de même pour l'analyse du parcours oculaire des participants, où un plus grand nombre de participants ayant des données valides permet l'analyse statistique des résultats. Cela demande de recruter des participants ne portant pas de lunettes et de développer une méthode de vérification de la calibration de l'oculomètre offrant une rétroaction plus rapide que celle employée dans notre étude.

Deuxièmement, nous avons manipulé le niveau d'encombrement visuel d'un seul écran, soit le PFD. Une prochaine expérience pourrait étudier les effets de l'encombrement visuel sur plusieurs écrans du poste de pilotage, comme la carte de navigation et les pages synoptiques. L'utilisation de plusieurs applications affichées sur plusieurs écrans s'approche du contexte d'utilisation réel des systèmes du poste de pilotage par le pilote. De plus, manipuler le niveau d'encombrement visuel de plusieurs écrans devrait amplifier les effets sur la performance du pilote mesurées dans notre étude.

Troisièmement, les pilotes ont réalisé un vol manuel sans assistance des systèmes de guidage automatisés. Ce choix a permis de mesurer l'effet de l'encombrement visuel sur la performance technique de vol. Une prochaine étude pourra s'intéresser à l'effet de l'encombrement visuel sur la surveillance et la détection de faille durant une approche avec les systèmes d'auto-pilote et d'auto-manette engagés. Contrairement à cette étude, les mesures de performance ne seront plus

la précision de l'approche – qui sera contrôlée par les systèmes de guidage automatisés – mais la facilité de surveiller l'état des systèmes et de détecter une faille.

Quatrièmement, nous avons utilisé un espace aérien simplifié pour l'approche. Il n'y avait pas de trafic aérien et aucune communication avec le contrôleur aérien n'a été réalisée. Ceci a simplifié la tâche des pilotes par rapport à un vol réel.

Cinquièmement, nous n'avons pas étudié l'effet d'un attribut visuel spécifique (p. ex., couleur, alignement, taille et distance des instruments) sur la performance ou la perception de l'encombrement visuel par les pilotes (van den Berg et al., 2008). Plutôt, nous avons modifié plusieurs attributs visuels afin d'augmenter le niveau d'encombrement de l'écran. Une prochaine étude pourrait caractériser la contribution à l'encombrement visuel de différents attributs visuels.

Sixièmement, il faut commenter les affichages utilisés dans cette étude. Nous avons conçu trois écrans expérimentaux afin de manipuler le niveau d'encombrement visuel du PFD, sans en modifier la fonction de guidage ou l'information primaire de vol. Cette décision est différente de celle prise par les études précédentes où les auteurs ont modifié la fonction de guidage, par exemple en ajoutant un affichage tunnel ou la vision synthétique, afin de varier l'encombrement visuel. Notre décision nous a permis de varier de manière importante l'encombrement visuel des trois écrans. L'étendue du niveau d'encombrement perçu pour nos écrans est de 5.5 à 13.9 sur l'échelle de (Kaber et al., 2008) dont l'étendue est de 1 à 20 points, alors qu'elle est de 8.8 à 11.0 pour (Kim et al., 2011), de 7.6 à 13.6 pour (Alexander et al., 2012) et de 8.1 à 12.3 pour (Moacdieh et al., 2013). Les affichages que nous avons conçus ont permis d'augmenter les différences entre les niveaux d'encombrement, et conséquemment d'amplifier l'effet de l'encombrement sur la performance du pilote. Toutefois, il s'agissait d'une augmentation artificielle de l'encombrement visuel, comme cela s'est fait dans toutes les études comportementales qui conçoivent leurs stimuli expérimentaux. Afin de tenir compte de ce point, nous avons décrit la méthode que nous avons utilisée pour concevoir les écrans, présentée au Chapitre 4. De plus, nous limitons la portée de nos résultats à l'étendue du niveau d'encombrement obtenue dans notre étude. Finalement, comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises dans la discussion, en dépit du fait que nos écrans aient l'étendue de niveau d'encombrement la plus importante des études citées, nous avons observé un effet limité de l'encombrement visuel sur la performance technique de vol des pilotes.

7.5 Futures recherches

En plus des pistes de recherche identifiées précédemment lors de la revue des limitations de notre étude, nous suggérons dans cette section deux sujets de recherche sur l'encombrement visuel qui méritent l'attention de la communauté scientifique.

Premièrement, une prochaine recherche pourrait s'intéresser à l'encombrement visuel de nouvelles technologies d'affichages du poste de pilotage, soit l'affichage tunnel, la vision synthétique et la vision améliorée. Ces nouvelles technologies utilisent une représentation graphique égocentrique différente que celle du PFD étudiée dans cette thèse et elles présentent plus d'informations à l'écran que l'affichage primaire de vol. Ces caractéristiques d'affichage posent des questions en termes de présentation de l'information à l'écran, de sa compréhension par l'opérateur et des effets sur la performance du pilote. La méthodologie développée dans cette thèse pour l'étude de l'encombrement visuel du PFD peut être appliquée pour ces nouveaux affichages afin d'isoler la variable de représentation graphique et mieux comprendre son impact sur la performance du pilote. Ce prochain projet de recherche est d'autant plus pertinent étant donné l'adoption croissante de ces nouvelles technologies d'affichage à bord du poste de pilotage d'avions commerciaux.

Deuxièmement, une prochaine étude pourrait porter sur la dépendance à la tâche des effets de l'encombrement visuel d'un affichage sur la performance. Durant la revue de littérature, nous avons montré que l'encombrement visuel a un effet important sur la performance de l'utilisateur pour une tâche de prospection visuelle, mais un effet faible pour une tâche de pilotage d'avion. Nous en avons conclu que l'effet de l'encombrement visuel sur la performance dépend de la nature de la tâche réalisée. Le but d'une prochaine recherche serait donc de caractériser l'effet de l'encombrement visuel sur la performance de tâches de différentes natures. Ce travail permettrait de développer une taxonomie de tâches en fonction de leur sensibilité à l'effet de l'encombrement visuel sur la performance. Les tâches étudiées devraient être suffisamment génériques afin de pouvoir généraliser les résultats obtenus, comme par exemple une tâche de lecture, de classement, d'ordonnancement et de prospection.

Une difficulté qui se pose pour réaliser une telle étude est la variation similaire du niveau d'encombrement visuel entre les conditions. Par exemple, comment valider que la condition ayant un niveau faible d'encombrement visuel soit similaire pour toutes les tâches? Pour ce faire,

nous suggérons d'utiliser l'échelle d'évaluation de l'encombrement visuel que nous avons employée dans notre étude. Celle-ci donne une évaluation sur une échelle continue du niveau d'encombrement. La comparaison du niveau d'encombrement entre les conditions se ferait donc avec une échelle continue plutôt que discrète (c.-à-d. faible, modéré ou élevé). De même, les résultats seraient présentés sur une échelle continue plutôt que discrète. Encore une fois, la méthodologie développée dans cette thèse pour l'évaluation du niveau d'encombrement devrait être utilisée pour la conception des interfaces graphiques employées dans cette future recherche.

BIBLIOGRAPHIE

Alexander, A. L., Kaber, D. B., Kim, S.-H., Stelzer, E. M., Kaufmann, K., & Prinzel, L. J. (2012). Measurement and Modeling of Display Clutter in Advanced Flight Deck Technologies. *The International Journal of Aviation Psychology*, 22(4), 299-318. doi:10.1080/10508414.2012.718233

Alexander, A. L., Stelzer, E. M., Kim, S.-H., & Kaber, D. B. (2008). Bottom-up and Top-down Contributors to Pilot Perceptions of Display Clutter in Advanced Flight Deck Technologies. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 52, p. 1180-1184).

Alexander, A. L., Stelzer, E. M., Kim, S.-H., Kaber, D. B., & Prinzel III, L. J. (2009). Data and Knowledge as Predictors of Perceptions of Display Clutter, Subjective Workload and Pilot Performance. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 53(1), 21-25. doi:10.1518/107118109X12524440832908

Alexander, A. L., Wickens, C. D., & Hardy, T. J. (2005). Synthetic Vision Systems: The Effects of Guidance Symbolology, Display Size, and Field of View. *Human Factors*, 47(4), 693-707.

Altaboli, A., & Lin, Y. (2011). Objective and Subjective Measures of Visual Aesthetics of Website Interface Design: The Two Sides of the Coin. Dans J. A. Jacko (Éd.), *Human-Computer Interaction. Design and Development Approaches* (Vol. 6761, p. 35-44). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Consulté à l'adresse <http://www.springerlink.com/content/d0212862883r2134/>

Aviram, G., & Rotman, S. R. (2000). Evaluating human detection performance of targets and false alarms, using a statistical texture image metric. *Optical Engineering*, 39(8), 2285-2295.

Bailey, R. E., Kramer, L. J., & Prinzel III, L. J. (2006). Crew and display concepts evaluation for synthetic/enhanced vision systems. Dans J. G. Verly & J. J. Guell (Éd.), *Enhanced and Synthetic Vision 2006* (Vol. 6226, p. 62260G-18). Présenté à Enhanced and Synthetic Vision 2006, Orlando (Kissimmee), FL, USA: SPIE. Consulté à l'adresse <http://link.aip.org/link/?PSI/6226/62260G/1>

- Baldassi, S., Megna, N., & Burr, D. C. (2006). Visual Clutter Causes High-Magnitude Errors. *PLoS Biol*, 4(3), e56. doi:10.1371/journal.pbio.0040056
- Barbu, C., Lohrenz, M. C., & Layne, G. (2006). Intelligent Electronic Navigational Aids: A New Approach. Dans *Machine Learning and Applications, 2006. ICMLA '06. 5th International Conference on* (p. 109-116). Présenté à Machine Learning and Applications, 2006. ICMLA '06. 5th International Conference on, Orlando, FL, USA. doi:10.1109/ICMLA.2006.30
- Beck, M. R., Lohrenz, M. C., & Trafton, J. G. (2010). Measuring Search Efficiency in Complex Visual Search Tasks: Global and Local Clutter. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 16(3), 238-250. doi:10.1037/a0019633
- Beck, M. R., Trenchard, M., Lamsweerde, A. van, Goldstein, R. R., & Lohrenz, M. (2012). Searching in clutter: Visual attention strategies of expert pilots. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 56, p. 1411-1415). doi:10.1177/1071181312561400
- Bennett, M. (2009, juin). *Designing For An Individual's Eyes: Human-Computer Interaction, Vision And Individual Differences* (Ph D). University College Dublin, Dublin, Irlande.
- Bolton, M. L., & Bass, E. J. (2009). Comparing perceptual judgment and subjective measures of spatial awareness. *Applied Ergonomics*, 40(4), 597-607. doi:10.1016/j.apergo.2008.04.020
- Bombardier Aéronautique. (2011). *Flight Deck Human Factors Design Standard* (No. RAE-C700-363) (p. 58). Montréal, Canada.
- Boston, B. N., & Braun, C. C. (1996). Clutter and display conformality: changes in cognitive capture. Dans *Proceedings of the 1996 40th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. Part 1 (of 2), September 2, 1996 - September 6, 1996* (Vol. 1, p. 57-61). Philadelphia, PA, USA: Human Factors and Ergonomics Society, Inc.
- Bravo, M. J., & Farid, H. (2004). Recognizing and segmenting objects in clutter. *Vision Research*, 44(4), 385-396.
- Bravo, M. J., & Farid, H. (2006). Object recognition in dense clutter. *Perception and Psychophysics*, 68(6), 911-918.

- Bravo, M. J., & Farid, H. (2008). A scale invariant measure of clutter. *Journal of Vision*, 8(1), 1-9. doi:10.1167/8.1.23
- Bringhurst, R. (2002). *The elements of typographic style*. Point Roberts, WA: Hartley & Marks.
- Burns, C. M. (2000). Putting It All Together: Improving Display Integration in Ecological Displays. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 42(2), 226-241. doi:10.1518/001872000779656471
- Cardaci, M., Di Gesù, V., Petrou, M., & Tabacchi, M. E. (2009). A fuzzy approach to the evaluation of image complexity. *Fuzzy Sets and Systems*, 160(10), 1474-1484. doi:10.1016/j.fss.2008.11.017
- Chang, D., Dooley, L., & Tuovinen, J. E. (2002). Gestalt theory in visual screen design: a new look at an old subject. Dans *Proceedings of the Seventh world conference on computers in education conference on Computers in education: Australian topics - Volume 8* (p. 5–12). Darlinghurst, Australia, Australia: Australian Computer Society, Inc. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=820060.820062>
- Chu, J., & Yang, G. (2010). A culture-based study on information density of e-commerce websites. Dans *2010 International Conference on Computer Design and Applications (ICCD)* (Vol. 4, p. V4-60-V4-63). Présenté à 2010 International Conference on Computer Design and Applications (ICCD), IEEE. doi:10.1109/ICCD.2010.5541492
- Comber, T., & Maltby, J. R. (1996). Investigating Layout Complexity. Présenté à Design, specification, and verification of interactive systems '96: proceedings of the Eurographics Workshop in Namur, Belgium, Namur, Belgique: Springer, Wien; New York.
- Comber, T., & Maltby, J. R. (1997). Layout complexity: does it measure usability? (p. 623-626). Présenté à Human-computer interaction: Interact '97, International Conference on Human-computer Interaction, Sydney, Australia: Chapman Hall, London.
- Curtis, M. T., Jentsch, F., & Wise, J. A. (2010). Aviation Displays (chap. 14). Dans E. Salas & D. E. Maurino (Éd.), *Human factors in aviation* (2nd éd., p. 439-478). Burlington, MA: Elsevier.

Danchak, M. M. (1985). QUANTITATIVE METHODS FOR JUDGING DISPLAY DESIGN QUALITY. Dans *Conference Record for 1985 IEEE Third Conference on Human Factors and Nuclear Safety*. (p. 178-183). Monterey, CA, USA: IEEE.

Darkow, D. J., & Marshak, W. P. (1998). In search of an objective metric for complex displays. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2, 1361-1365.

Despain, B. B. (2008, octobre 21). Photos: Boeing 737-832 Aircraft Pictures | Airliners.net. *Airliners.net*. Consulté 12 mars 2014, à l'adresse <http://www.airliners.net/photo/Delta-Air-Lines/Boeing-737-832/1465077/L/>

Donderi, D. C. (2006). Visual Complexity: A Review. *Psychological Bulletin*, 132(1), 73-97. doi:10.1037/0033-2909.132.1.73

Donderi, D. C., & McFadden, S. (2005). Compressed file length predicts search time and errors on visual displays. *Displays*, 26(2), 71-78. doi:16/j.displa.2005.02.002

Dorighi, N., Ellis, S., & Grunwald, A. (1991). Evaluation of perspective displays on pilot spatial awareness in low visibility curved approaches. Dans *AIAA Computing in Aerospace Conference*, 8th (p. 153-158). Washington, DC.

Doyon-Poulin, P., & Ouellette, B. (2011). Visual Clutter of Complex Displays: Review of Existing Measures. Présenté à AERO 2011, Montréal, Canada: Canadian Aerospace Institute (CASI).

Doyon-Poulin, P., Ouellette, B., & Robert, J.-M. (2012). Review of visual clutter and its effects on pilot performance: A new look at past research. Dans *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2012 IEEE/AIAA 31st* (p. 2D1-1 -2D1-11). Présenté à Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2012 IEEE/AIAA 31st. doi:10.1109/DASC.2012.6382290

Du Puy de Goyné, T., Plays, Y., Lepourry, P., & Besse, J. (2010). *Initiation à l'Aéronautique* (6^e édition.). Cépaduès.

Eckstein, M. P. (2011). Visual search: A retrospective. *Journal of Vision*, 11(5). doi:10.1167/11.5.14

Edwards, E. (1988). Introductory overview (chap. 1). Dans E. L. Wiener & D. C. Nagel (Éd.), *Human factors in aviation* (p. 3-25). San Diego, Calif: Academic Press.

- Emeyriat, B. (1997). *Facteurs humains en sécurité aérienne*. Modulo.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 32-64.
- Endsley, M. R. (1996). Automation and situation awareness. Dans R. Parasuraman & M. Mouloua (Éd.), *Automation and human performance: Theory and applications* (p. 163-181). Lawrence Erlbaum.
- Ewing, G. J., Woodruff, C. J., & Vickers, D. (2006). Effects of « local » clutter on human target detection. *Spatial Vision*, 19(1), 37-60. doi:10.1163/156856806775009232
- FAA. (2007). *Advisory Circular (AC) Electronic Flight Deck Displays* (Advisory Circular No. AC 25-11A) (p. 114). Consulté à l'adresse http://rgl.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgAdvisoryCircular.nsf/0/7D6139991C94E7D9862573080063F84D?OpenDocument
- Fadden, S., Ververs, P. M., & Wickens, C. D. (2001). Pathway HUDs: Are They Viable? *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(2), 173 -193. doi:10.1518/001872001775900841
- Fitz, P. M. and C. (1993). Gestalt Theory and Instructional Design. *Journal of Technical Writing and Communication*, 23(2), 1-1. doi:10.2190/G748-BY68-L83T-X02J
- Flight Standards Service. (2008). *Airline Transport Pilot and Aircraft Type Rating - Practical Test Standards for Airplane* (No. FAA-S-8081-5F) (p. 99). Washington, DC: Federal Aviation Administration.
- Forsythe, A. (2009). Visual Complexity: Is That All There Is? Dans *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (p. 158-166). Consulté à l'adresse http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02728-4_17
- Fraternali, P., & Tisi, M. (2008). Identifying Cultural Markers for Web Application Design Targeted to a Multi-cultural Audience. Dans *Eighth International Conference on Web Engineering, 2008. ICWE '08* (p. 231-239). Présenté à Eighth International Conference on Web Engineering, 2008. ICWE '08, IEEE. doi:10.1109/ICWE.2008.34

- Gannon, A. J. (2005). *The effects of flightdeck display interface aesthetics on pilot performance and workload* (Ph D). Arizona State University, United States -- Arizona.
- Gannon, A. J. (2010). Flight Deck Aesthetics and Pilot Performance: New Uncharted Seas (chap. 16). Dans J. A. Wise, V. D. Hopkin, & D. J. Garland (Éd.), *Handbook of Aviation Human Factors* (2nd ed., p. 16.1-16.21). Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Grunwald, A. J. (1984). Tunnel display for four-dimensional fixed-wing aircraft approaches. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*.
- Grunwald, A. J., Robertson, J. B., & Hatfield, J. J. (1980). *Evaluation of a computer-generated perspective tunnel display for flight path following* (No. NASA Technical Paper 1736). Washington, DC.
- Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904-908. doi:10.1177/154193120605000909
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. Dans P. A. Hancock & N. Meshkati (Éd.), *Human mental workload* (p. 239-250). Amsterdam, Netherlands.
- Hartmann, J., Sutcliffe, A., & Angeli, A. D. (2008). Towards a theory of user judgment of aesthetics and user interface quality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 15, 15:1–15:30. doi:10.1145/1460355.1460357
- Hassenzahl, M. (2004). The Interplay of Beauty, Goodness, and Usability in Interactive Products. *Human-Computer Interaction*, 19(4), 319-349. doi:10.1207/s15327051hci1904_2
- Hayes, J., Moore, A., & Wong, B. L. W. (2006). Information layering to de-clutter displays for emergency ambulance dispatch. Dans *Proceedings of the 13th European conference on Cognitive ergonomics: trust and control in complex socio-technical systems* (p. 10–16). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1274892.1274895
- Henderson, J. M. (2003). Human gaze control during real-world scene perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 498-504. doi:10.1016/j.tics.2003.09.006

- Henderson, J. M., Chanceaux, M., & Smith, T. J. (2009). The influence of clutter on real-world scene search: Evidence from search efficiency and eye movements. *Journal of Vision*, 9(1), 1-8. doi:10.1167/9.1.32
- Honeywell. (2007, avril). Tech Spotlight - IPFD - Magazine - News & Events - Honeywell Aerospace Engineering. *Honeywell*. Consulté 12 février 2014, à l'adresse <http://honeywell.com/sites/aero-technology/News-Events/Magazines/Pages/ipfd.aspx>
- Horrey, W. J., & Wickens, C. D. (2004). Driving and Side Task Performance: The Effects of Display Clutter, Separation, and Modality. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(4), 611-624. doi:10.1518/hfes.46.4.611.56805
- Itti, L., Koch, C., & Niebur, E. (1998). A Model of Saliency-Based Visual Attention for Rapid Scene Analysis. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 20(11), 1254-1259.
- Johnson, J. (2010). *Designing with the Mind in Mind: Simple Guide to Understanding User Interface Design Rules* (1st éd.). Burlington, MA: Morgan Kaufmann.
- Kaber, D. B., Alexander, A. L., Stelzer, E. M., Kim, S.-H., Kaufmann, K., & Hsiang, S. (2008). Perceived Clutter in Advanced Cockpit Displays: Measurement and Modeling with Experienced Pilots. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 79, 1007-1018. doi:10.3357/ASEM.2319.2008
- Kaufmann, K. A., & Kaber, D. B. (2010). The Influence of Individual Differences in Perceptual Performance on Pilot Perceptions of Head-Up Display Clutter. Dans *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings* (Vol. 54, p. 70-74). Human Factors and Ergonomics Society. doi:10.1518/107118110794010171
- Kim, S.-H., Prinzel, L. J., Kaber, D. B., Alexander, A. L., Stelzer, E. M., Kaufmann, K., & Veil, T. (2011). Multidimensional measure of display clutter and pilot performance for advanced head-up display. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 82(11), 1013-1022. doi:10.3357/ASEM.3017.2011
- Koonce, J. M. (1979). Aviation psychology in the U.S.A.: Present and future. Dans F. Fehler (Éd.), *Aviation psychology research*. Brussels, Belgium: Western European Association for Aviation Psychology.

- Koonce, J. M., & Debons, A. (2010). A Historical Overview of Human Factors in Aviation (chap. 1). Dans J. A. Wise, V. D. Hopkin, & D. J. Garland (Éd.), *Handbook of Aviation Human Factors* (2nd ed., p. 1.1 - 1.11). Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Kroft, P., & Wickens, C. D. (2002). Displaying multi-domain graphical database information: An evaluation of scanning, clutter, display size, and user activity. *Information Design Journal*, 11(1), 44-52. doi:10.1075/idj.11.1.06kro
- Lavie, T., Oron-Gilad, T., & Meyer, J. (2011). Aesthetics and usability of in-vehicle navigation displays. *International Journal of Human-Computer Studies*, 69(1-2), 80-99. doi:10.1016/j.ijhcs.2010.10.002
- Lavie, T., & Tractinsky, N. (2004). Assessing dimensions of perceived visual aesthetics of web sites. *International Journal of Human-Computer Studies*, 60(3), 269-298. doi:10.1016/j.ijhcs.2003.09.002
- Law, E. L.-C., & van Schaik, P. (2010). Modelling user experience - An agenda for research and practice. *Interacting with Computers*, 22(5), 313-322. doi:16/j.intcom.2010.04.006
- Leshed, G., Velden, T., Rieger, O., Kot, B., & Sengers, P. (2008). In-car gps navigation: engagement with and disengagement from the environment. Dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 1675-1684). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1357054.1357316
- Liggett, K. (2010). Controls, Displays, and Crew Station Design (chap. 15). Dans J. A. Wise, V. D. Hopkin, & D. J. Garland (Éd.), *Handbook of Aviation Human Factors* (2nd ed., p. 15.1-15.36). Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Lindgaard, G., & Dudek, C. (2003). What is this evasive beast we call user satisfaction? *Interacting with Computers*, 15(3), 429-452. doi:10.1016/S0953-5438(02)00063-2
- Ling, C., Lopez, M., & Shehab, R. (2011). Complexity questionnaires of visual displays: a validation study of two information complexity questionnaires of visual displays. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*. doi:10.1002/hfm.20327
- Ling, J., & van Schaik, P. (2002). The effect of text and background colour on visual search of Web pages. *Displays*, 23(5), 223-230. doi:10.1016/S0141-9382(02)00041-0

Lloyd, N. (2006). *Clutter Measurement and Reduction for Enhanced Information Visualization*. Consulté à l'adresse <http://stinet.dtic.mil/oai/oai?&verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA446995>

Lohrenz, M. C., & Beck, M. R. (2010). Evidence of Clutter Avoidance in Complex Scenes. *Perception & Performance*, 5, 1355-1359.

Lohrenz, M. C., & Hansman, R. J. (2004). Investigating Issues Of Display Content Vs. Clutter During Air-To-Ground Targeting Missions. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society (HFES)*. Présenté à 48th Annual Meeting, New Orleans, LA. Consulté à l'adresse <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/35757>

Lohrenz, M. C., Trafton, J., Beck, M., & Gendron, M. (2009). A Model of Clutter for Complex, Multivariate Geospatial Displays. *Human Factors*, 51(1), 90-101. doi:10.1177/0018720809333518

Macdonald, S. A. (1991). *Entre ciel et terre*. (H. Ménard-Jenkevice, Trad.). St-Hubert, Qc: Centre du pilot V.I.P. Inc.

Mackenzie, S. (2013, octobre 11). Within-subjects vs. Between-subjects Designs: Which to Use? *Scott MacKenzie's home page on York University*. Consulté 12 janvier 2014, à l'adresse <http://www.yorku.ca/mack/RN-Counterbalancing.html>

Matthews, G., Reinerman-Jones, L. E., Barber, D. J., & Abich, J. (2014). The Psychometrics of Mental Workload Multiple Measures Are Sensitive but Divergent. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 0018720814539505. doi:10.1177/0018720814539505

Mayhew, D. J. (1992). Screen layout and design (chap. 14). Dans *Principles and guidelines in software user interface design* (p. 458-506). Prentice Hall.

McCrobie, D. (2000). Visual Display Screen Clutter Metrics. Dans *Proceedings of the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics* (Vol. 4, p. 457-460). Présenté à Ergonomics for the New Millenium, Toronto. Consulté à l'adresse <http://www.ingentaconnect.com/content/hfes/hfproc/2000/00000044/00000004/art00015>

- Military Interface Standard. (1996). *Aircraft Display Symbology* (No. MIL-STD-1787B) (p. 157). USA: Department of Defense.
- Military Interface Standard. (1999). *Design Criteria Standard: Human Engineering* (No. MIL-STD-1472F) (p. 219). USA: Department of Defense.
- Miyoshi, T., & Murata, A. (2001). A method to evaluate properness of GUI design based on complexity indexes of size, local density, alignment, and grouping. Dans *2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 7, 2001 - October 10, 2001* (Vol. 1, p. 221-226). Tucson, AZ, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Consulté à l'adresse <http://dx.doi.org/10.1109/ICSMC.2001.969815>
- Moacdieh, N. M., Prinett, J. C., & Sarter, N. B. (2013). Effects of Modern Primary Flight Display Clutter Evidence from Performance and Eye Tracking Data. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 11-15. doi:10.1177/1541931213571005
- Moacdieh, N. M., & Sarter, N. B. (2012). Eye Tracking Metrics: A Toolbox for Assessing the Effects of Clutter on Attention Allocation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 1366-1370. doi:10.1177/1071181312561391
- Moshagen, M., & Thielsch, M. T. (2010). Facets of visual aesthetics. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(10), 689-709. doi:10.1016/j.ijhcs.2010.05.006
- Mulder, J. A., van Paassen, M. M., & Mulder, M. (2004). Perspective guidance displays show the way ahead. *Journal of aerospace computing, information, and communication*, 1, 428-431.
- Mullet, K., & Sano, D. (1995). *Designing visual interfaces: communication oriented techniques*. Englewood Cliffs, NJ: SunSoft Press.
- Muthard, E. K., & Wickens, C. D. (2005). *Display Size Contamination of Attentional and Spatial Tasks: An Evaluation of Display Minification and Axis Compression* (Technical Report No. AHFD-05-12/NASA-05-3). Savoy, Illinois: University of Illinois.
- Naylor, J. (2010, mai 15). *The Influence of Dynamics, Flight Domain and Individual Flight Training & Experience on Pilot Perception of Clutter in Aviation Displays* (M. Sc). North Carolina State University, Raleigh, NC, United states.

- Neider, M. B., & Zelinsky, G. J. (2011). Cutting through the clutter: Searching for targets in evolving complex scenes. *Journal of Vision*, 11(14). doi:10.1167/11.14.7
- Ngo, D. C. L., Teo, L. S., & Byrne, J. G. (2003). Modelling interface aesthetics. *Information Sciences*, 152, 25-46. doi:10.1016/S0020-0255(02)00404-8
- Noble, J., & Constantine, L. L. (1996). Interactive design metric visualization: visual metric support for user interface design. Dans *Computer-Human Interaction, 1996. Proceedings., Sixth Australian Conference on* (p. 213-220). Présenté à Computer-Human Interaction, 1996. Proceedings., Sixth Australian Conference on. doi:10.1109/OZCHI.1996.560013
- Noyes, J. M., & Bruneau, D. P. J. (2007). A self-analysis of the NASA-TLX workload measure. *Ergonomics*, 50(4), 514-519. doi:10.1080/00140130701235232
- OACI. (2013). Facts & Figures. Consulté 21 mars 2013, à l'adresse <http://www.icao.int/sustainability/Pages/FactsFigures.aspx>
- Oliva, A., Mack, M. L., Shrestha, M., & Peeper, A. (2004). Identifying the perceptual dimensions of visual complexity of scenes. Dans *Proc. of the 26th Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (p. 1041-1046). Chicago, Illinois.
- Palmer, E. M., Clausner, T. C., & Kellman, P. J. (2008). Enhancing air traffic displays via perceptual cues. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 5, 4:1-4:22. doi:10.1145/1279640.1279644
- Parrish, R. V., Busquets, A. M., Williams, S. P., & Nold, D. E. (1994). *Spatial awareness comparisons between large-screen, integrated pictorial displays and conventional EFIS displays during simulated landing approaches* (No. NASA Technical Paper 3467) (p. 30). Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center.
- Parush, A., Nadir, R., & Shtub, A. (1998). Evaluating the Layout of Graphical User Interface Screens: Validation of a Numerical Computerized Model. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(4), 343-360.
- Parush, A., Shwarts, Y., Shtub, A., & Chandra, M. J. (2005). The impact of visual layout factors on performance in web pages: A cross-language study. *Human Factors*, 47(1), 141-157.

Pfautz, S. L., Schurr, N., Ganberg, G., Bauer, D., & Scerri, P. (2011). Agent Based Intelligent Decluttering Enhancements. Dans *Workshops at the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence* (p. 32-35). Consulté à l'adresse <http://www.aaai.org/ocs/index.php/WS/AAAIW11/paper/view/3947>

Phillips, R. J., & Noyes, L. (1982). An Investigation of Visual Clutter in the Topographic Base of a Geological Map. *Cartographic Journal, The*, 19, 122-132.

Pieters, R., Wedel, M., & Batra, R. (2010). The Stopping Power of Advertising: Measures and Effects of Visual Complexity. *Journal of Marketing*, 74(5), 48-60. doi:10.1509/jmkg.74.5.48

Podczerwinski, E. S., Wickens, C., & Alexander, A. L. (2002). *Exploring the « Out-of-Sight, Out-of-Mind » Phenomenon in Dynamic Settings Across Electronic Map Displays* (ARL Technical Report No. ARL-01-8/NASA-01-4) (p. 28). Savoy, Illinois: University of Illinois.

Prinzel III, L. J., Arthur III, J. J., Kramer, L. J., & Bailey, R. E. (2004). Pathway concepts experiment for head-down synthetic vision displays, 11-22. doi:10.1117/12.545580

Prinzel, L. J., Kramer, L. J., Arthur, J. J., Bailey, R. E., & Comstock, R. J. (2004). Comparison of Head-Up and Head-Down « Highway-in-the-Sky » Tunnel and Guidance Concepts for Synthetic Vision Displays. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 48(1), 11-15. doi:10.1177/154193120404800104

Regal, D. M., & Knapp, B. G. (1984). AID FOR IMPROVED INFORMATION PROCESSING OF HIGH DENSITY COMPUTER GENERATED VISUAL DISPLAYS. Dans *Proceedings of the Human Factors Society 28th Annual Meeting: New Frontiers for Science and Technology*. (Vol. 1, p. 538). San Antonio, TX, USA: Human Factors Soc.

Reimer, B., Mehler, B., & Coughlin, J. F. (2012). *An Evaluation of Typeface Design in a Text-Rich Automotive User Interface* (White Paper No. 2012-12) (p. 36). Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.

Robert, J.-M. (2008). Vers la plénitude de l'expérience utilisateur. Dans *Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine* (p. 3-10). Metz, France: ACM. doi:10.1145/1512714.1512716

- Rosenholtz, R., Dorai, A., & Freeman, R. (2011). Do predictions of visual perception aid design? *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 8(2), 12:1–12:20. doi:10.1145/1870076.1870080
- Rosenholtz, R., Li, Y., Mansfield, J., & Jin, Z. (2005). Feature congestion: a measure of display clutter. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (p. 761-770). Portland, Oregon, USA: ACM. doi:10.1145/1054972.1055078
- Rosenholtz, R., Li, Y., & Nakano, L. (2007). Measuring visual clutter. *Journal of Vision*, 7(2:17), 1-22. doi:10.1167/7.2.17
- Rosenholtz, R., Twarog, N. R., Schinkel-Bielefeld, N., & Wattenberg, M. (2009). An intuitive model of perceptual grouping for HCI design. Dans *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems* (p. 1331-1340). Boston, MA, USA: ACM. doi:10.1145/1518701.1518903
- Rotman, S. R., Tidhar, G., & Kowalczyk, M. L. (1994). Clutter metrics for target detection systems. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 30(1), 81-91. doi:10.1109/7.250408
- Rubio, S., Díaz, E., Martín, J., & Puente, J. M. (2004). Evaluation of Subjective Mental Workload: A Comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile Methods. *Applied Psychology*, 53(1), 61-86. doi:10.1111/j.1464-0597.2004.00161.x
- Rüdiger, H. (2007). A Tool for Cross-Cultural Human Computer Interaction Analysis. Dans N. Aykin (Éd.), *Usability and Internationalization. HCI and Culture* (Vol. 4559, p. 89-98). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Consulté à l'adresse <http://www.springerlink.com/content/u25n548r6l522452/>
- SAE International. (1998). *Head-Up Display Human Factor Issues* (No. ARD50016) (p. 32). Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc.
- Shive, J., & Francis, G. (2012). Choosing Colors for Map Display Icons Using Models of Visual Search. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. doi:10.1177/0018720812459341

- Simmons, J. P., Nelson, L. D., & Simonsohn, U. (2011). False-Positive Psychology Undisclosed Flexibility in Data Collection and Analysis Allows Presenting Anything as Significant. *Psychological Science*, 22(11), 1359-1366. doi:10.1177/0956797611417632
- Smith, S. L., & Mosier, J. N. (1986). *Guidelines for designing user interface software*. Natl Technical Information.
- Thomas, J. C., & Richards, J. T. (2008). Chap. 9. Achieving psychological simplicity: Measures and methods to reduce cognitive complexity. Dans J. A. Jacko & A. Sears (Éd.), *Human-Computer Interaction: Design Issues, Solutions, and Applications* (Taylor and Francis., p. 161-179).
- Tractinsky, N. (1997). Aesthetics and apparent usability: empirically assessing cultural and methodological issues. Dans *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems* (p. 115–122). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/258549.258626
- Tractinsky, N., Katz, A. ., & Ikar, D. (2000). What is beautiful is usable. *Interacting with Computers*, 13(2), 127-145. doi:10.1016/S0953-5438(00)00031-X
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1), 97-136. doi:10.1016/0010-0285(80)90005-5
- Tullis, T. S. (1981). EVALUATION OF ALPHANUMERIC, GRAPHIC, AND COLOR INFORMATION DISPLAYS. *Human Factors*, 23(5), 541-550.
- Tullis, T. S. (1983). Formatting of Alphanumeric Displays: A Review and Analysis. *Human Factors*, 25(6), 657-682.
- Tullis, T. S. (1984). *Predicting the usability of alphanumeric displays*. Rice University, United States -- Texas.
- Tullis, T. S. (1988). Screen design. *Handbook of human-computer interaction*, 2, 503-532.
- Tullis, T. S. (1997). Screen Design (chap. 23). Dans M. Helander, T. K. Landaeur, & P. Prabbhu (Éd.), *Handbook of human-computer interaction* (2e éd., p. 503-531). North-Holland: Elsevier.

- Van den Berg, R., Cornelissen, F. W., & Roerdink, J. B. T. M. (2008). Perceptual dependencies in information visualization assessed by complex visual search. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 4(4), 3:1–3:21. doi:10.1145/1278760.1278763
- Van den Berg, R., Cornelissen, F. W., & Roerdink, J. B. T. M. (2009). A crowding model of visual clutter. *Journal of Vision*, 9(4), 1-11. doi:10.1167/9.4.24
- Ververs, P. M., & Wickens, C. D. (1996). Effect of clutter and lowlighting symbology on pilot performance with head-up displays. Dans *Proceedings of the 1996 40th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society. Part 1 (of 2), September 2, 1996 - September 6, 1996* (Vol. 1, p. 62-66). Philadelphia, PA, USA: Human Factors and Ergonomics Society, Inc.
- Ververs, P. M., & Wickens, C. D. (1998). Head-Up Displays: Effect of Clutter, Display Intensity, and Display Location on Pilot Performance. *The International Journal of Aviation Psychology*, 8(4), 377-403. doi:10.1207/s15327108ijap0804_4
- Vicente, K. J. (2002). Ecological Interface Design: Progress and Challenges. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44, 62-78. doi:10.1518/0018720024494829
- Waldman, G., Wootton, J., Hobson, G., & Luetkemeyer, K. (1988). A normalized clutter measure for images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 42(2), 137-156. doi:10.1016/0734-189X(88)90161-2
- Ware, C. (2004). *Information Visualization: Perception for Design* (2nd éd.). San Fransico, CA: Morgan Kaufmann.
- Watzman, S. (2003). Visual design principles for usable interfaces. Dans J. A. Jacko & A. Sears (Éd.), *The human-computer interaction handbook* (p. 263–285). Hillsdale, NJ, USA: L. Erlbaum Associates Inc. Consulté à l'adresse <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=772072.772092>
- Weller, D. (2004). The Effects of Contrast and Density on Visual Web Search. *Usability News*, 6(2). Consulté à l'adresse <http://www.surl.org/usabilitynews/62/density.asp>
- Wertheimer, M. (1938). Laws of organization in perceptual forms. *A source book of Gestalt psychology*, 71-88.

Wickens, C. D. (2003). Aviation Displays (chap. 5). Dans P. S. Tsang & M. A. Vidulich (Éd.), *Principles and Practice of Aviation Psychology* (p. 147-199). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Wickens, C. D., Alexander, A. L., Ambinder, M. S., & Martens, M. (2004). The role of highlighting in visual search through maps. *Spatial Vision*, 17(4-5), 373-388. doi:10.1163/1568568041920195

Wickens, C. D., Alexander, A. L., Horrey, W. J., Nunes, A., & Hardy, T. J. (2004). Traffic and Flight Guidance Depiction on a Synthetic Vision System Display: The Effects of Clutter on Performance and Visual Attention Allocation. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 48, 218-222.

Wickens, C. D., Kroft, P., & Yeh, M. (2000). Data Base Overlay in Electronic Map Design: Testing a Computational Model. Dans *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings* (Vol. 44, p. 451-454). Présenté à Visual Performance, Human Factors and Ergonomics Society. Consulté à l'adresse <http://www.ingentaconnect.com/content/hfes/hfproc/2000/00000044/00000021/art00019>

William Moroney, D. B. (1995). Some Measurement and Methodological Considerations in the Application of Subjective Workload Measurement Techniques. *International Journal of Aviation Psychology - INT J AVIAT PSYCHOL*, 5(1), 87-106. doi:10.1207/s15327108ijap0501_6

Williamson, G. W. (1937, août 19). Instrument Planning The New Service Blind-Flying Panel Described. *Flight*, 32(1495), 193-195.

Wolfe, J. M. (2007). Guided Search 4.0: Current progress with a model of visual search. Dans *Integrated models of cognitive systems (Ed.)* (Oxford., p. pp.99-119). New-York: Gray W.

Woods, D. D., Patterson, E. S., & Roth, E. M. (2002). Can We Ever Escape from Data Overload? A Cognitive Systems Diagnosis. *Cognition, Technology & Work*, 4(1), 22-36. doi:10.1007/s101110200002

Wu, O., Chen, Y., Li, B., & Hu, W. (2010). Learning to evaluate the visual quality of web pages. Dans *19th International World Wide Web Conference, WWW2010, April 26, 2010 - April 30, 2010* (p. 1205-1206). Raleigh, NC, United states: Association for Computing Machinery. Consulté à l'adresse <http://dx.doi.org/10.1145/1772690.1772876>

Wu, O., Chen, Y., Li, B., & Hu, W. (2011). Evaluating the visual quality of web pages using a computational aesthetic approach. Dans *Proceedings of the fourth ACM international conference on Web search and data mining* (p. 337–346). New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1935826.1935883

Xing, J. (2007). *Information Complexity in Air Traffic Control Displays* (No. DOT/FAA/AM-07/26) (p. 19). Oklahoma City, OK 73125: Federal Aviation Administration. Consulté à l'adresse <http://www.faa.gov/library/reports/medical/oamtechreports/2000s/media/200726.pdf>

Yang, Y., & Klemmer, S. R. (2009). Aesthetics matter: leveraging design heuristics to synthesize visually satisfying handheld interfaces. Dans *Proceedings of the 27th international conference extended abstracts on Human factors in computing systems* (p. 4183-4188). Boston, MA, USA: ACM. doi:10.1145/1520340.1520637

Yeh, M., Merlo, J. L., Wickens, C. D., & Brandenburg, D. L. (2003). Head Up versus Head Down: The Costs of Imprecision, Unreliability, and Visual Clutter on Cue Effectiveness for Display Signaling. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 45, 390-407. doi:10.1518/hfes.45.3.390.27249

Yeh, M., & Wickens, C. D. (2001). Attentional Filtering in the Design of Electronic Map Displays: A Comparison of Color Coding, Intensity Coding, and Decluttering Techniques. *Human Factors*, 43(4), 543. doi:Article

Yeh, M., Wickens, C. D., & Seagull, F. J. (1999). Target Cuing in Visual Search: The Effects of Conformality and Display Location on the Allocation of Visual Attention. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 41(4), 524-542. doi:10.1518/001872099779656752

Zheng, X. S., Chakraborty, I., Lin, J. J. W., & Rauschenberger, R. (2008). Developing Quantitative Metrics to Predict Users Perceptions of Interface Design. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 52, 2023-2027.

Zuschlag, M. (2004). Quantification of Visual Clutter using a Computational Model of Human Perception; an Application for Head-Up Displays. Dans *Human performance, situation awareness and automation; Current research and trends HPSAA II (Eds.)* (Vol. 2, p. 143-148). Dennis A. Vincenzi; Mustapha Mouloua; Peter A. Hancock.

ANNEXE A – Certificat de conformité éthique de la recherche avec des sujets humains



Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains

Adresse civique :
Campus de l'Université de Montréal
2900, boul. Édouard-Montpetit
École Polytechnique
2500, chemin de Polytechnique
H3T 1J4

Adresse postale :
C.P. 6079, succursale Centre-ville
Montréal (Québec) Canada
H3C 3A7

Téléphone : (514) 340-4990
Télécopieur : (514) 340-4992

École affiliée à
l'Université de Montréal

Membres réguliers du comité :

Marie-Josée Bernardi, juriste et éthicienne
Mario Bourgault, mathématiques et génie industriel
Farida Cheriet, génie informatique et génie logiciel*
Sophie De Serres, IRSST
Jolaine Périé-Cormier, génie mécanique
Élodie Petit, juriste et éthicienne
Jean-Marc Robert, mathématiques et génie industriel

Céline Roehrig, secrétaire

* présidente du Comité

CERTIFICAT D'ACCEPTATION D'UN PROJET DE RECHERCHE PAR LE COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC DES ÊTRES HUMAINS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Montréal, le 19 juillet 2012

M. Philippe Doyon-Poulin
M. Jean-Marc Robert
Département de mathématiques et génie industriel
École Polytechnique de Montréal

N/Réf : Dossier CÉR-11/12-20

Messieurs,

J'ai le plaisir de vous informer que les membres du Comité d'éthique de la recherche ont procédé à l'évaluation en comité restreint de votre projet de recherche intitulé « *Évaluation de l'encombrement visuel des écrans du cockpit d'avion* » et en ont recommandé l'approbation sur la base des modifications apportées à votre documentation transmises par courriel le 10 juillet à Mme Roehrig.

Veuillez noter que le présent certificat est valable pour le projet tel que soumis au Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains. La secrétaire du Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains devra immédiatement être informée de toute modification qui pourrait être apportée ultérieurement au protocole expérimental, de même que de tout problème imprévu pouvant avoir une incidence sur la santé et la sécurité des personnes impliquées dans le projet de recherche (sujets, professionnels de recherche ou chercheurs).

Nous vous prions également de nous faire parvenir un bref **rapport annuel** ainsi qu'un avis à la fin de vos travaux.

Je vous souhaite bonne chance dans vos travaux de recherche,

Farida Cheriet, présidente
Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains

c.c.: Céline Roehrig, DRI

ANNEXE B – Message de sollicitation à l'intention des pilotes

Objet : Recrutement de pilotes pour une étude portant sur l'encombrement visuel du PFD (Primary Flight Display)

Bonjour,

Je réalise présentement une étude sur les effets de l'encombrement visuel de l'écran PFD sur la performance et la satisfaction des pilotes. Pour ce faire, je sollicite la participation de 24 pilotes pour effectuer des tests de vol en simulateur. Le critère de sélection des participants est d'être un pilote ayant au moins 100 heures d'expérience de vol aux instruments.

Si vous choisissez de participer, vous contribuerez à une recherche de haut niveau pour améliorer la qualité de l'écran PFD et vous pourrez tester de nouveaux symboles sur l'écran PFD. La session expérimentale est d'une durée prévue de moins de 2 heures.

Cette étude est faite en collaboration avec l'équipe de facteurs humains de Bombardier Aéronautique et s'insère dans mon projet de doctorat à l'École Polytechnique de Montréal.

Pour plus d'informations, vous pouvez me rejoindre par téléphone ou par courriel.

Tél : 514-855-5001poste 64007

Bureau : K-13-80 BAN 1 Nord – 2^e étage

Courriel : philippe.doyon-poulin@polymtl.ca

Merci de votre intérêt,

Philippe Doyon-Poulin

Subject: Pilot solicitation for a study on PFD (Primary Flight Display) visual clutter

Greetings,

I'm currently doing a study on PFD visual clutter and its effects on pilots' performance and satisfaction. To this end, I solicit the participation of 24 pilots for an experimental session with a flight simulator. Selection criterion is to be a pilot with at least 100 hours of experience with instruments flight.

If you would like to take part in this study, you will contribute to leading-edge research to improve the PFD and have the opportunity to try new symbols on the PFD. The session will take less than 2 hours of your time.

This study is realized in partnership with the human factors team at Bombardier Aerospace and is part of my doctorate at École Polytechnique de Montréal.

For more information, please contact me by phone or email.

Tel : 514-855-5001 ext. 64007

Desk: K-13-80 BAN 1 North – 2nd floor

Email: philippe.doyon-poulin@polymtl.ca

Regards,

Philippe Doyon-Poulin

ANNEXE C – Formulaire de consentement à la recherche

Bombardier Aerospace / École Polytechnique de Montréal

Consent Form for Research

Research Title: Evaluation of Visual Clutter on Cockpit Displays

Principal Investigator: Philippe Doyon-Poulin (514) 855-5001 #64007

Ph. D. student, École Polytechnique de Montréal

Department : Mathematics and Industrial Engineering, Montréal

Supervisor at École Polytechnique de Montréal :

Jean-Marc Robert, Professor (514) 340-4711 #4566

Supervisor at Bombardier Aerospace:

Benoit Ouellette, (514) 855-5001 #50557

Research extends from May 1st 2012 to April 30th 2013.

1. Goal of this research

This study is about visual clutter of flight displays. Its goal is to allow us to learn more about the effects of visual clutter on human performance, satisfaction, and safety.

2. Your activities

During this session, you will be asked to do the following activities:

- (1) Complete a questionnaire on your biographic data;
- (2) Read the flight scenario and flight instructions. During practice and test trials, you will be given a specific scenario to follow, including aircraft status and required actions. The scenario will be to complete ILS approach to CYUL runway 06L using the Primary Flight Display (PFD).
- (3) Complete one (1) practice test trials to become familiar with the flight simulator and the flight scenario you are asked to follow;
- (4) After completing the practice test trials, you will be asked to rank the relative importance of workload factors and pairs of display clutter descriptors based on your experience during the practice test trials;
- (5) Complete nine (9) experimental trials. Each trial will take approximately 10 minutes to complete. At the end of each experimental trial, you will be asked to provide ratings of workload, overall subjective clutter and aesthetics perception of the display you just used during the experimental trial;
- (6) Once all experimental trials are completed, you will be asked to answer questions on your perception of clutter and your overall perception of the experiment (debriefing interview).

This entire procedure will occur in one session and will take less than 2 hours of your time.

3. Selection criteria

To take part in this study, you must have at least 100 hours of experience with instrument flight and knowledge of the Bombardier Global cockpit.

4. Benefits and risks

Your participation in this study will contribute to the advancement of knowledge on visual clutter and its effects on performance. Your participation also gives you the opportunity to test new display symbology.

There are no anticipated risks associated with this study. You will take a 5-minute break at four occasions during the experiment, and we will remind you to take these breaks to rest and stretch your legs. Note that you can suspend the experiment at any time with no prejudice if you were to experience discomfort or visual strain from observing the simulator displays over an extended period of time.

5. Compensation

You will be asked to participate in this study during your regular work schedule. You will not receive compensation for your participation in this study.

6. Data collection

We will collect data on your pilot experience. This includes age, gender, logged flight hours as captain and first officer, and type of aircraft flown.

Technical flight performance data will be logged by the flight simulator. This includes current time, altitude, airspeed, bank inclination, pitch inclination, heading. We will record the reaction time and accuracy of the response for the monitoring task.

We will also collect data on your perception of visual clutter and task demand. We will ask you to complete three (3) short questionnaires on (a) clutter rating, (b) aesthetics perception, and (c) task workload. At the end of the simulation, you will be asked to fill out a questionnaire about your overall perception of clutter and the factors contributing most to it. We will record the debriefing interview with an audiotape to save your comments. These comments will be transcribed for further analysis.

7. Confidentiality

All the data collected during the study are confidential and only the individuals working on the project (identified at the beginning of this form) will have access to them. Data will be coded using participant number (e.g., P1) to keep your identity confidential. The study material and your signed consent form will be kept under locked supervision at the main researcher's facility. The study material and signed consent

forms will be destroyed ten (10) years after the study is completed. No reference will be made to you in oral or written reports, which could link you to the study.

8. Freedom to withdraw

Your participation in this study is voluntary; you may decline to participate without any prejudice. If you decide to participate, you may withdraw at any time without penalty and without loss of benefits to which you are otherwise entitled. You are free not to answer any questions or respond to experimental situations that you choose without penalty. You can ask for additional details or information at any time during the study. Your consent does not restrict your judiciary rights in the event of a research-related injury.

9. Funding and conflict of interest

This research project is funded by the Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQ-NT), the Natural sciences and engineering research council of Canada (NSERC) and Bombardier Aerospace.

The research members have raised no conflict of interest, potential or apparent in the course of this research.

10. Additional information

For additional information regarding this project, you can contact my supervisor at École Polytechnique, Mr. Jean-Marc Robert, by phone (514) 340- 4711 # 4566 or by email jean-marc.robert@polymtl.ca.

The Research Ethics Board of École Polytechnique de Montréal approved this research project. If you have any questions regarding your participation in this project, if you feel you have not been treated according to the details provided in this form, or if your rights as a participant in a research project have been violated during the course of this project, you may contact the Committee chair, Mrs. Farida Cheriet, by phone (514) 340-4711 #4277 or by email farida.cheriet@polymtl.ca.

11. Appreciation

Your collaboration is essential for the progress of this project and the research team thanks you for taking part in it. If you would like to receive a written abstract of the principal findings of this study, please add your contact information at the end of this form.

12. Consent

I have read the Consent Form for Research and conditions of this project. I have had all my questions answered. I hereby acknowledge the above and give my voluntary consent:

Participant's name : _____

Participant's signature : _____ Date : _____

Investigator's name : _____

(or his delegate)

Investigator's signature : _____ Date : _____

(or his delegate)

ANNEXE D – Questionnaire biographique

We would like to know about you and your flight operations experience. .

Date: _____

Participant: _____.

Age : _____

Gender : ☐ Male ☐ Female

Former Military? ☐ Yes ☐ No

Service: _____ Years of Service: _____ Rank: _____

Total Flight Hours : _____

Total IFR Hours : _____

Total Flight Hours Last 12 Months : _____

Are you experienced with Sidestick control ? ☐ Yes ☐ No

Total Aircraft Hours using sidestick : _____ Total Simulator Hours for sidestick : _____

Are you experienced with Fly-by-wire (FBW) aircraft? ☐ Yes ☐ No

Total Aircraft Hours for FBW : _____ Total Simulator Hours for FBW : _____

Grade (Check those that apply) : ☐ ATP ☐ Commercial

ANNEXE E – NASA-TLX

Definition of Task Demand Factor

Mental demand

How much mental and perceptual activity was required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc.)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?

Physical demand

How much physical activity was required (e.g., pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc.)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?

Temporal demand

How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?

Performance

How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How satisfied were you with your performance in accomplishing these goals?

Frustration level

How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent did you feel during the task?

Effort

How hard did you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?

NASA-TLX Mental Workload Rankings

For each of the pairs listed below, circle the scale title that represents the more important contributor to workload in the display.

Mental Demand	or	Physical Demand
---------------	----	-----------------

Mental Demand	or	Temporal Demand
---------------	----	-----------------

Mental Demand	or	Performance
---------------	----	-------------

Mental Demand	or	Effort
---------------	----	--------

Mental Demand	or	Frustration
---------------	----	-------------

Physical Demand	or	Temporal Demand
-----------------	----	-----------------

Physical Demand	or	Performance
-----------------	----	-------------

Physical Demand	or	Effort
-----------------	----	--------

Physical Demand	or	Frustration
-----------------	----	-------------

Temporal Demand	or	Performance
-----------------	----	-------------

Temporal Demand	or	Effort
-----------------	----	--------

Temporal Demand	or	Frustration
-----------------	----	-------------

Performance	or	Effort
-------------	----	--------

Performance	or	Frustration
-------------	----	-------------

Effort	or	Frustration
--------	----	-------------

NASA-TLX Mental Workload Ratings

Please place an "X" along each scale at the point that best indicates your experience with the display.

Mental Demand: How much mental and perceptual activity was required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc.)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?



Physical demand: How much physical activity was required (e.g., pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc.)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?



Temporal demand: How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?



Performance: How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How satisfied were you with your performance in accomplishing these goals?



Frustration level: How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent did you feel during the task?



Effort: How hard did you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?



ANNEXE F – Évaluation de l’encombrement visuel

Definitions of “Clutter” Descriptor Terms

Redundancy

Orthogonal

- Definition: Being mutually independent (relative to something else); composed of mutually exclusive elements; statistically independent.
- Synonyms: Unique, exclusive, independent.

Redundant

- Definition: Exceeding what is necessary or normal; characterized by or containing an excess; characterized by similarity or repetition.
- Synonyms: Repetitive, superfluous, inessential.

Colorfulness

Monochromatic

- Definition: Having or consisting of only one color or hue; lacking variety, creativity, or excitement.
- Synonyms: Colorless, neutral, plain.

Colorful

- Definition: Full of color; having striking colors; characterized by rich variety.
- Synonyms: Vivid, vibrant, striking.

Salience

Salient

- Definition: Standing out conspicuously; of notable significance beyond its surroundings.
- Synonyms: Prominent, striking, remarkable.

Not Salient

- Definition: Difficult to detect; imperceptible to the senses.
- Synonyms: Inconspicuous, unnoticeable, subtle.

Dynamics**Static**

- Definition: Having no motion; showing little change.
- Synonyms: Unmoving, stationary, fixed.

Dynamic

- Definition: Characterized by continuous change, activity, or progress.
- Synonyms: Active, driving, compelling.

Variability**Monotonous**

- Definition: Repetitiously dull or lacking in variety; tediously uniform or unvarying.
- Synonyms: Constant, boring, unvarying.

Variable

- Definition: Likely to vary; likely to change frequently, suddenly, or unexpectedly.
- Synonyms: Unstable, fluctuating, inconstant.

Density**Sparse**

- Definition: Thinly scattered or distributed; occurring at widely-spaced intervals.
- Synonyms: Thin, meager, distributed.

Dense

- Definition: Having component parts packed closely together.
- Synonyms: Thick, compact, concentrated.







Subjective Clutter Rankings

For each of the pairs listed below, circle the scale title that represents the more important contributor to clutter in the display.


Redundancy	or	Colorfulness
Redundancy	or	Salience
Redundancy	or	Dynamics
Redundancy	or	Variability
Redundancy	or	Density
Colorfulness	or	Salience
Colorfulness	or	Dynamics
Colorfulness	or	Variability
Colorfulness	or	Density
Salience	or	Dynamics
Salience	or	Variability
Salience	or	Density
Dynamics	or	Variability
Dynamics	or	Density
Variability	or	Density

Subjective Clutter Ratings

Please place an “X” along each scale at the point that best indicates your experience with the display configuration.

Redundancy		
		
Orthogonal		Redundant
Colorfulness		
		
Monochromatic		Colorful
Salience		
		
Salient		Not Salient
Dynamics		
		
Static		Dynamic
Variability		
		
Monotonous		Variable
Density		
		
Sparse		Dense

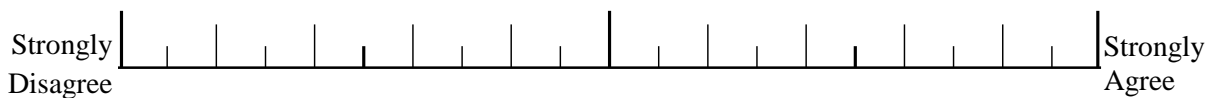
Please rate your **overall perception** of “clutter” for the current display by placing an “X” at the desired point on the scale below.

	
Low Clutter	High Clutter

ANNEXE G – Qualités visuelles

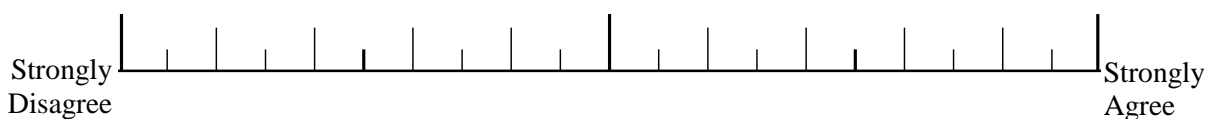
The display interface is ***Clean***.

Neat and tidy; free from flaws.



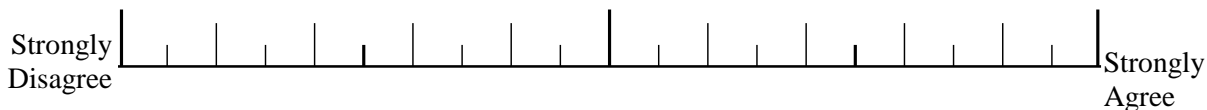
The display interface is ***Clear***.

Easily seen; distinct; obvious; logical; positive; apparent; unambiguous.



The display interface is ***Pleasant***.

Agreeable to the mind or sense; pleasing; having an agreeable look; enjoyable.



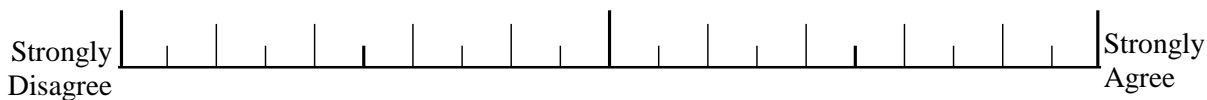
The display interface is ***Symmetrical***.

Balance of form; correspondence of opposite; parts in size/shape/position.



The display interface is ***Aesthetics***.

Beautiful; sensitive to art and beauty.



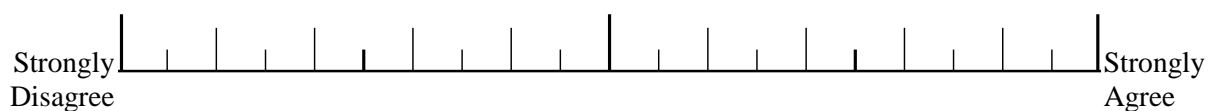
The display interface is ***Original***.

*New, novel, unique; being that from which
copies are made.*



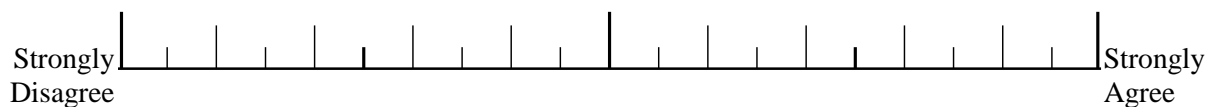
The display interface is ***Sophisticated***.

*Highly complex or developed in
form; clever; refined.*



The display interface is ***Fascinating***.

Charming or captivating; compelling.



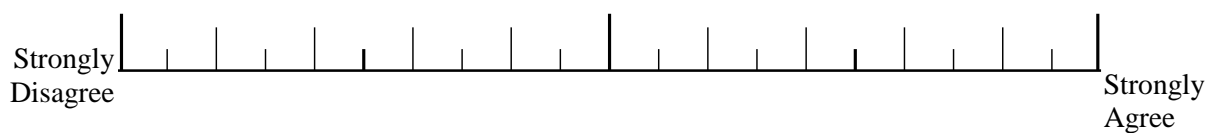
The display interface is ***Creative***.

Inventive, Imaginative.



The display interface ***Uses Special Effects***.

*Distinctive, unique, or exceptional, graphical
rendering or animation techniques employed.*



ANNEXE H – Ordre de présentation des PFDs

Le Tableau H.1 présente l'ordre de présentation des écrans ayant un encombrement faible, modéré ou élevé pour chaque participant. Pour chaque écran, le pilote a réalisé trois répétitions du vol d'approche. L'écran utilisé pour le vol de pratique est le PFD conventionnel du Bombardier Global. Notez que le nombre total de participants doit être un multiple de trois pour contrebalancer l'ordre de présentation des écrans.

Tableau H.1 Ordre de présentation des écrans

Participant	Pratique	1 ^{er} écran	2 ^e écran	3 ^e écran
1	Conventionnel	Faible	Modéré	Élevé
2	Conventionnel	Modéré	Élevé	Faible
3	Conventionnel	Élevé	Faible	Modéré
4	Conventionnel	Faible	Modéré	Élevé
5	Conventionnel	Modéré	Élevé	Faible
6	Conventionnel	Élevé	Faible	Modéré
7	Conventionnel	Faible	Modéré	Élevé
8	Conventionnel	Modéré	Élevé	Faible
9	Conventionnel	Élevé	Faible	Modéré
10	Conventionnel	Faible	Modéré	Élevé
11	Conventionnel	Modéré	Élevé	Faible
12	Conventionnel	Élevé	Faible	Modéré

ANNEXE I – Résultats des analyses statistiques

Cette annexe présente les tableaux des tests d'Analyse de la variance (ANOVA) et du test de Chi-carré, dans le même ordre qu'au Chapitre 6 Résultats et discussion. Nous avons utilisé le logiciel Statistica® version 8.0 pour réaliser l'analyse statistique. Le plan expérimental des analyses est présenté à la section 5.7.1 Plan expérimental.

Résultats subjectifs

Niveau d'encombrement perçu

Tableau I.2 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le niveau d'encombrement perçu.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	3448,299	1	3448,299	276,0114	$< 1.0 \times 10^{-9}$	0,961674
Erreur	137,427	11	12,493			
Encombrement	422,858	2	211,429	42,3961	$< 5.0 \times 10^{-8}$	0,793992
Erreur	109,714	22	4,987			

Tableau I.3 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour le niveau d'encombrement perçu.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0003	0,0001
Modéré	-	0,0009

Régression linéaire entre le niveau d'encombrement perçu et la perception d'encombrement global

Tableau I.4 Résumé de la régression linéaire pour la variable dépendante : perception de l'encombrement global en fonction du niveau d'encombrement perçu.

Facteur	β	Erreur standard de β	B	Erreur standard de B	t(34)	p
Origine			-3,295	1,4715	-2,239	0,031798
Niveau d'encombrement	0,8502	0,0902	1,296	0,1375	9,419	0,0000001

Charge mentale de travail

Tableau I.5 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour la charge mentale de travail.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	5416,960	1	5416,960	440,6421	<0,0000001	0,975644
Erreur	135,227	11	12,293			
Encombrement	91,699	2	45,849	8,6737	0,001669	0,440877
Erreur	116,293	22	5,286			

Tableau I.6 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour la charge mentale de travail.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0242	0,4648
Modéré	-	0,0016

Qualités visuelles

Qualités visuelles globales

Tableau I.7 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour les qualités visuelles globales.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	3231,923	1	3231,923	339,4633	<0,0000001	0,968613
Erreur	104,728	11	9,521			
Encombrement	205,415	2	102,708	22,6036	0,000005	0,672654
Erreur	99,965	22	4,544			

Tableau I.8 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour les qualités visuelles globales.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0059	0,0100
Modéré	-	0,0001

Qualités visuelles expressives

Tableau I.9 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour les qualités visuelles expressives.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	2070,250	1	2070,250	98,59898	0,000001	0,899634
Erreur	230,963	11	20,997			
Encombrement	62,160	2	31,080	3,89681	0,035587	0,261587
Erreur	175,467	22	7,976			

Tableau I.10 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour les qualités visuelles expressives.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0345	0,7696
Modéré	-	0,1317

Qualités visuelles classiques

Tableau I.11 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour les qualités visuelles classiques.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	4651,240	1	4651,240	362,6569	<0,0000001	0,970561
Erreur	141,080	11	12,825			
Encombrement	554,660	2	277,330	57,3534	<0,0000001	0,839072
Erreur	106,380	22	4,835			

Tableau I.12 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour les qualités visuelles classiques.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0091	0,0001
Modéré	-	0,0001

Qualités visuelles esthétiques

Tableau I.13 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour les qualités visuelles esthétiques.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	1936,000	1	1936,000	179,4607	<0,0000001	0,942245
Erreur	118,667	11	10,788			
Encombrement	854,000	2	427,000	33,8726	<0,0000001	0,754862
Erreur	277,333	22	12,606			

Tableau I.14 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour les qualités visuelles esthétiques.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0091	0,0001
Modéré	-	0,0001

Classement des écrans

Tableau I.15 Lequel des écrans a été le plus utile pour la tâche de vol? Distribution des fréquences observées et attendues.

Niveau d'encombrement	Observées (O)	Attendues (E)	O – E	$(O - E)^2 / E$
Faible	2,00	4,00	-2,00	1,00
Modéré	10,00	4,00	6,00	9,00
Élevé	0,00	4,00	-4,00	4,00
Somme	12,00	12,00	0,00	14,00

Tableau I.16 Lequel des écrans a offert la meilleure précision de vol? Distribution des fréquences observées et attendues.

Niveau d'encombrement	Observées (O)	Attendues (E)	O – E	$(O - E)^2 / E$
Faible	4,00	4,00	0,00	0,00
Modéré	7,00	4,00	3,00	2,25
Élevé	1,00	4,00	-3,00	2,25
Somme	12,00	12,00	0,00	4,50

Tableau I.17 Lequel des écrans a été le plus encombré? Distribution des fréquences observées et attendues.

Niveau d'encombrement	Observées (O)	Attendues (E)	O – E	(O – E)² / E
Faible	0,00	4,00	-4,00	4,000
Modéré	0,00	4,00	-4,00	4,0000
Élevé	12,00	4,00	8,00	16,00
Somme	12,00	12,00	0,00	24,00

Tableau I.18 Lequel des écrans a été le moins encombré? Distribution des fréquences observées et attendues.

Niveau d'encombrement	Observées (O)	Attendues (E)	O – E	(O – E)² / E
Faible	12,00	4,00	8,00	16,00
Modéré	0,00	4,00	-4,00	4,0000
Élevé	0,00	4,00	-4,00	4,0000
Somme	12,00	12,00	0,00	24,00

Performance technique de vol

Durée d'une étape de vol

Tableau I.19 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets de la durée d'une étape de vol.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	1387229	1	1387229	1733,349	0,000000	0,993694
Erreur	8803	11	800			
Segment	1104	1	1104	11,622	0,005834	0,513747
Erreur	1045	11	95			
Encombrement	1140	2	570	3,084	0,065946	0,218996
Erreur	4065	22	185			
Répétition	240	2	120	0,717	0,499467	0,061160
Erreur	3688	22	168			
Segment x Encombrement	180	2	90	2,083	0,148384	0,159241
Erreur	952	22	43			
Segment x Répétition	113	2	57	2,004	0,158657	0,154109
Erreur	621	22	28			
Encombrement x Répétition	206	4	51	0,521	0,721074	0,045182
Erreur	4350	44	99			
Segment x Encombrement x Répétition	60	4	15	0,461	0,764142	0,040195
Erreur	1429	44	32			

Tableau I.20 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD de la durée d'une étape de vol.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0623	0,2139
Modéré	-	0,7846

Déviati n latérale moyenne – *Localizer*

Tableau I.21 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour la déviation latérale moyenne.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	13,63986	1	13,63986	104,8954	0,000001	0,905087
Erreur	1,43036	11	0,13003			
Segment	0,06300	1	0,06300	3,6540	0,082324	0,249353
Erreur	0,18966	11	0,01724			
Encombrement	0,20235	2	0,10118	3,6643	0,042309	0,249880
Erreur	0,60745	22	0,02761			
R�p�titi�n	0,31023	2	0,15511	11,6281	0,000358	0,513879
Erreur	0,29347	22	0,01334			
Segment x Encombrement	0,00970	2	0,00485	0,1886	0,829433	0,016857
Erreur	0,56579	22	0,02572			
Segment x R�p�titi�n	0,09950	2	0,04975	4,3657	0,025308	0,284118
Erreur	0,25070	22	0,01140			
Encombrement x R�p�titi�n	0,05486	4	0,01372	0,5149	0,725140	0,044712
Erreur	1,17211	44	0,02664			
Segment x Encombrement x R�p�titi�n	0,03665	4	0,00916	0,6139	0,654861	0,052861
Erreur	0,65673	44	0,01493			

Tableau I.22 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour la déviation latérale moyenne.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0333	0,4164
Modéré	-	0,3494

Contrôle de la déviation latérale – *Localizer*

Tableau I.23 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de la déviation latérale.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	11,59955	1	11,59955	92,60136	0,000001	0,893824
Erreur	1,37790	11	0,12526			
Segment	0,16895	1	0,16895	15,32164	0,002416	0,582093
Erreur	0,12130	11	0,01103			
Encombrement	0,46172	2	0,23086	7,83945	0,002689	0,416119
Erreur	0,64787	22	0,02945			
Répétition	0,18743	2	0,09372	4,13721	0,029841	0,273314
Erreur	0,49834	22	0,02265			
Segment x Encombrement	0,00797	2	0,00398	0,23811	0,790124	0,021187
Erreur	0,36799	22	0,01673			
Segment x Répétition	0,09927	2	0,04963	4,72976	0,019560	0,300688
Erreur	0,23087	22	0,01049			
Encombrement x Répétition	0,19135	4	0,04784	2,34540	0,069271	0,175746
Erreur	0,89744	44	0,02040			
Segment x Encombrement x Répétition	0,03521	4	0,00880	1,19693	0,325589	0,098134
Erreur	0,32362	44	0,00736			

Tableau I.24 Niveau de signification du test post-hoc de Tukey HSD pour le contrôle de la déviation latérale.

Niveau d'encombrement	Modéré	Élevé
Faible	0,0024	0,0341
Modéré	-	0,4853

Déviati n verticale moyenne – *Glideslope*

Tableau I.25 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour la déviation verticale moyenne.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	60,00106	1	60,00106	22,56148	0,000600	0,672243
Erreur	29,25391	11	2,65945			
Segment	0,01293	1	0,01293	0,18982	0,671493	0,016964
Erreur	0,74912	11	0,06810			
Encombrement	0,00194	2	0,00097	0,00617	0,993849	0,000561
Erreur	3,46534	22	0,15752			
R�p�titi�n	1,17141	2	0,58571	1,89176	0,174536	0,146742
Erreur	6,81141	22	0,30961			
Segment x Encombrement	0,05612	2	0,02806	0,14658	0,864493	0,013150
Erreur	4,21135	22	0,19142			
Segment x R�p�titi�n	0,40799	2	0,20399	0,98401	0,389670	0,082110
Erreur	4,56078	22	0,20731			
Encombrement x R�p�titi�n	1,82993	4	0,45748	1,22712	0,313137	0,100360
Erreur	16,40368	44	0,37281			
Segment x Encombrement x R�p�titi�n	0,18741	4	0,04685	0,22368	0,923753	0,019929
Erreur	9,21649	44	0,20947			

Contrôle de la déviation verticale – *Glideslope*

Tableau I.26 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de la déviation verticale.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	25,54132	1	25,54132	61,09398	0,000008	0,847421
Erreur	4,59873	11	0,41807			
Segment	0,58635	1	0,58635	11,04235	0,006795	0,500961
Erreur	0,58411	11	0,05310			
Encombrement	0,03272	2	0,01636	0,35865	0,702629	0,031575
Erreur	1,00355	22	0,04562			
Répétition	0,00524	2	0,00262	0,05541	0,946233	0,005012
Erreur	1,04103	22	0,04732			
Segment x Encombrement	0,04566	2	0,02283	0,45971	0,637399	0,040115
Erreur	1,09264	22	0,04967			
Segment x Répétition	0,13476	2	0,06738	2,11290	0,144755	0,161131
Erreur	0,70160	22	0,03189			
Encombrement x Répétition	0,41588	4	0,10397	1,54025	0,207184	0,122824
Erreur	2,97008	44	0,06750			
Segment x Encombrement x Répétition	0,24236	4	0,06059	2,53911	0,053140	0,187539
Erreur	1,04998	44	0,02386			

Inclinaison moyenne du mini manche sur l'axe de roulis

Tableau I.27 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour l'inclinaison moyenne du mini manche sur l'axe de roulis.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	214,7339	1	214,7339	58,07209	0,000010	0,840746
Erreur	40,6748	11	3,6977			
Segment	3,5405	1	3,5405	23,22433	0,000537	0,678591
Erreur	1,6769	11	0,1524			
Encombrement	3,3637	2	1,6818	2,43486	0,110855	0,181234
Erreur	15,1962	22	0,6907			
Répétition	1,7390	2	0,8695	1,70432	0,205047	0,134153
Erreur	11,2238	22	0,5102			
Segment x Encombrement	0,4845	2	0,2422	1,73965	0,198878	0,136554
Erreur	3,0633	22	0,1392			
Segment x Répétition	0,6538	2	0,3269	1,44213	0,257916	0,115907
Erreur	4,9873	22	0,2267			
Encombrement x Répétition	5,6914	4	1,4229	4,18266	0,005886	0,275489
Erreur	14,9679	44	0,3402			
Segment x Encombrement x Répétition	0,3988	4	0,0997	0,64810	0,631218	0,055640
Erreur	6,7683	44	0,1538			

Contrôle de l'inclinaison du mini manche sur l'axe de roulis

Tableau I.28 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de l'inclinaison du mini manche sur l'axe de roulis.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	756,1834	1	756,1834	69,05171	0,000005	0,862589
Erreur	120,4607	11	10,9510			
Segment	7,1664	1	7,1664	17,96086	0,001393	0,620177
Erreur	4,3890	11	0,3990			
Encombrement	7,7864	2	3,8932	2,26721	0,127275	0,170888
Erreur	37,7777	22	1,7172			
Répétition	2,1935	2	1,0967	0,94995	0,402060	0,079494
Erreur	25,3993	22	1,1545			
Segment x Encombrement	1,5343	2	0,7671	2,59096	0,097626	0,190639
Erreur	6,5137	22	0,2961			
Segment x Répétition	2,2150	2	1,1075	1,86721	0,178234	0,145114
Erreur	13,0488	22	0,5931			
Encombrement x Répétition	13,6889	4	3,4222	4,49118	0,003951	0,289918
Erreur	33,5274	44	0,7620			
Segment x Encombrement x Répétition	0,6667	4	0,1667	0,58258	0,676851	0,050298
Erreur	12,5886	44	0,2861			

Inclinaison moyenne du mini manche sur l'axe de tangage

Tableau I.29 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour l'inclinaison moyenne du mini manche sur l'axe de tangage.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	303,6469	1	303,6469	12,37046	0,004822	0,529320
Erreur	270,0074	11	24,5461			
Segment	0,1721	1	0,1721	0,43357	0,523783	0,037921
Erreur	4,3662	11	0,3969			
Encombrement	1,7387	2	0,8694	0,84950	0,441184	0,071691
Erreur	22,5143	22	1,0234			
Répétition	2,1126	2	1,0563	1,21248	0,316575	0,099282
Erreur	19,1666	22	0,8712			
Segment x Encombrement	0,6682	2	0,3341	1,96869	0,163480	0,151803
Erreur	3,7337	22	0,1697			
Segment x Répétition	0,5057	2	0,2528	0,94684	0,403216	0,079254
Erreur	5,8747	22	0,2670			
Encombrement x Répétition	1,3263	4	0,3316	0,57832	0,679864	0,049949
Erreur	25,2277	44	0,5734			
Segment x Encombrement x Répétition	1,4922	4	0,3731	1,49129	0,221190	0,119386
Erreur	11,0069	44	0,2502			

Contrôle de l'inclinaison du mini manche sur l'axe de tangage

Tableau I.30 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de l'inclinaison du mini manche sur l'axe de tangage.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	187,2204	1	187,2204	55,55350	0,000013	0,834719
Erreur	37,0710	11	3,3701			
Segment	0,0095	1	0,0095	0,05611	0,817102	0,005075
Erreur	1,8663	11	0,1697			
Encombrement	1,9845	2	0,9923	1,81582	0,186255	0,141686
Erreur	12,0218	22	0,5464			
Répétition	0,2341	2	0,1171	0,53658	0,592207	0,046511
Erreur	4,8001	22	0,2182			
Segment x Encombrement	0,2318	2	0,1159	0,71575	0,499862	0,061093
Erreur	3,5621	22	0,1619			
Segment x Répétition	0,2512	2	0,1256	1,15859	0,332356	0,095290
Erreur	2,3854	22	0,1084			
Encombrement x Répétition	1,8639	4	0,4660	2,66959	0,044463	0,195294
Erreur	7,6803	44	0,1746			
Segment x Encombrement x Répétition	1,0335	4	0,2584	2,61838	0,047684	0,192268
Erreur	4,3420	44	0,0987			

Vitesse verticale moyenne

Tableau I.31 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour la vitesse verticale moyenne.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	88892202	1	88892202	621,3673	0,000000	0,982605
Erreur	1573649	11	143059			
Segment	311088	1	311088	9,2548	0,011203	0,456918
Erreur	369752	11	33614			
Encombrement	52119	2	26060	1,2022	0,319515	0,098525
Erreur	476878	22	21676			
Répétition	34718	2	17359	0,7825	0,469578	0,066412
Erreur	488051	22	22184			
Segment x Encombrement	2813	2	1406	0,0792	0,924106	0,007150
Erreur	390608	22	17755			
Segment x Répétition	26667	2	13333	1,3312	0,284620	0,107953
Erreur	220353	22	10016			
Encombrement x Répétition	88224	4	22056	0,8646	0,492721	0,072869
Erreur	1122502	44	25511			
Segment x Encombrement x Répétition	49126	4	12282	0,8646	0,492666	0,072876
Erreur	624984	44	14204			

Contrôle de la vitesse verticale

Tableau I.32 Analyse de la variance avec mesures répétées et taille des effets pour le contrôle de la vitesse verticale moyenne.

Facteur	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	F	p	η^2 partiel
Origine	11776444	1	11776444	60,79040	0,000008	0,846776
Erreur	2130943	11	193722			
Segment	205804	1	205804	10,57862	0,007701	0,490236
Erreur	214002	11	19455			
Encombrement	18256	2	9128	0,63952	0,537074	0,054944
Erreur	314006	22	14273			
Répétition	4789	2	2395	0,12422	0,883801	0,011167
Erreur	424105	22	19278			
Segment x Encombrement	54903	2	27452	1,75951	0,195500	0,137898
Erreur	343242	22	15602			
Segment x Répétition	55287	2	27644	2,12366	0,143455	0,161819
Erreur	286375	22	13017			
Encombrement x Répétition	119528	4	29882	1,32360	0,276136	0,107404
Erreur	993355	44	22576			
Segment x Encombrement x Répétition	17871	4	4468	0,42666	0,788559	0,037339
Erreur	460747	44	10472			

ANNEXE J – Autorisation d'utilisation des photographies

Re: Airlines.net photo feedback: Request to use your photograph

Sujet: Re: Airlines.net photo feedback: Request to use your photograph
 De: Brett Despain <jetjockdal@mac.com>
 Date : Sun, 22 Jun 2014 08:13:28 -0600
 Pour: Philippe Doyon-Poulin <philippe.doyon.poulin@gmail.com>

Hello Philippe,

Thank you for contacting me. Yes, please feel free to use my image in your thesis. I'm glad it will help your presentation. Thank you for providing me with a photo credit in your work. Good luck on you PhD studies!

Best Regards,

Brett Despain

On Jun 22, 2014, at 07:50 , Philippe Doyon-Poulin <philippe.doyon.poulin@gmail.com> wrote:

Mr. Despain,

I'm Philippe Doyon-Poulin and I'm a PhD student at Polytechnique Montréal, Canada. My research concerns visual clutter of flight displays, especially the primary flight display (PFD). You can view the results of my work and published articles on my website <http://doyon-poulin.ca/>

In my thesis, I present three different flight displays (HUD and PFD) to show the range of information and symbols displayed, from a low-density display (HUD) to a high-density display (cluttered PFD).

I'm writing you to ask your permission to include your picture of the HUD in my thesis. I found that your picture shows clearly the symbology on HUD and helps explaining my research on visual clutter. I will not modify nor alter the original picture, nor use it in any other work. The picture will have the following legend (my work is in French, so I translated the legend to English below):

HUD display from Boeing 737-832 in final approach to San Francisco. Picture by Brett B. Despain ©, used with permission of the author (Despain, 2008).

Where the reference is a link to the page on airlines.net. Concerning the distribution of the work, when my thesis will be accepted by the jury (in a few months from now) the work will be made available to download in PDF on a database of theses (ProQuest Dissertations & Theses).

I thank you for your attention, and I'm looking forward to hearing from you.

Best regards,

Philippe Doyon-Poulin

 Message was sent using the mail interface on Airlines.net
<http://www.airliners.net/search/photo.search?id=1465077>

To uphold the good reputation of the photographer community, please try to reply to photo usage requests.